ORBITY NAUKI

wiedza i życie

Gavin Hesketh

CZĄSTKI ELEMENTARNE

W POSZUKIWANIU FUNDAMENTALNEJ NATURY RZECZYWISTOŚCI

Prószyński i S-ka

CZĄSTKI ELEMENTARNE

W POSZUKIWANIU FUNDAMENTALNEJ NATURY RZECZYWISTOŚCI

GAVIN HESKETH

Przełożyli Urszula i Mariusz Seweryńscy

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
THE PARTICLE ZOO. THE SEARCH FOR THE FUNDAMENTAL NATURE OF REALITY

Copyright © 2016 Gavin Hesketh
All rights reserved
First published in Great Britain in 2016 by Quercus Editions Ltd

Projekt okładki
Prószyński Media

Ilustracje Jeff Edwards; © CERN

Redaktor serii
Adrian Markowski

Redakcja
Anna Kaniewska

Korekta
Zofia Firek

ISBN 978-83-8123-531-0

Warszawa 2017

Wydawca
Prószyński Media Sp. z o.o.
02-697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

Dla mojej rodziny

NOTA OD AUTORA I PODZIĘKOWANIA

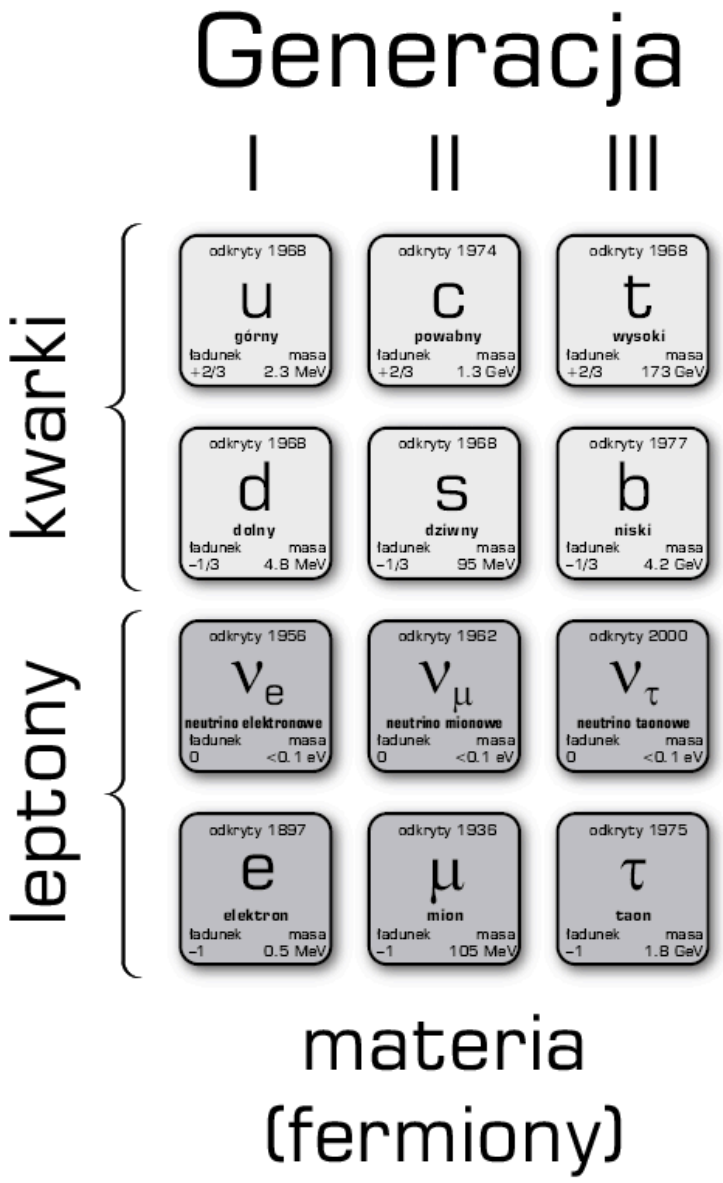
To książka o Wszechświecie w najmniejszej skali. Kiedy spoglądamy na świat w tej właśnie skali, wszystko wydaje się stworzone z tego samego budulca, najbardziej fundamentalnych obiektów, jakie znamy: cząstek. Przystępując do pisania, chciałem dać czytelnikowi pewne wyobrażenie o tym, czym są te cząstki, jak się zachowują, skąd mogły się wziąć i dzięki czemu to wszystko wiemy. Pierwsza rzecz, którą o cząstkach trzeba wiedzieć, to fakt, że nie zachowują się one jak reszta ciał we Wszechświecie, z pewnością nie tak jak ciała, które znamy z naszych codziennych doświadczeń. To właśnie sprawia, że świat cząstek subatomowych jest tak interesujący, jednak dlatego też opisanie go stanowi nie lada wyzwanie.

Główny problem polega na tym, że najlepszym językiem do opisu świata cząstek jest matematyka. Z jednej strony więc, jeśli naprawdę chcecie zrozumieć cząstki, musicie nauczyć się ich języka, czyli poznać matematykę. Z drugiej strony, myślę, że wielkie idee i ciekawe koncepcje można oddzielić od równań matematycznych i zaprezentować w kategoriach codziennych doświadczeń. Taki przyświeca mi cel, gdy piszę tę książkę: ożywić subatomowy świat analogiami wykorzystującymi to, co znamy z naszego otoczenia. Analogie są jednak tylko metaforą, mają swoje ograniczenia, tak więc gdy któraś nie wyjdzie najlepiej, będzie to moja wina. Matematyka zwykle nie zwodzi na manowce!

Inny wybór, przed którym stanąłem w trakcie pisania tej książki, dotyczył selekcji materiału: co włączyć, a co pominąć? Fizyka cząstek rozwijała się przez ponad sto lat, a w rozwój ten zaangażowane były tysiące błyskotliwych uczonych – to mnóstwo ciekawych wątków do omówienia. Moja opowieść zawiera zatem ogólny zarys historii i opis współcześnie najbardziej fascynujących obszarów badań, ale nie

stanowi wyczerpującej relacji. Pojawiają się w tej opowieści różni ludzie, ale również tu musiałem dokonywać wyboru. Tam gdzie mowa o historycznych osiągnięciach, za które już przyznano Nagrodę Nobla, podaję nazwiska badaczy kojarzonych z tymi odkryciami. Jednak w wypadku aktualnie prowadzonych badań sprawy nie są tak oczywiste. Wydaje mi się, że byłbym niesprawiedliwy, wybierając jedną lub dwie osoby związane z odkryciem bozonu Higgsa lub sformułowaniem teorii supersymetrii w znanej dziś formie. Postęp w nauce zawsze dokonywał się dzięki zbiorowemu wysiłkowi i nigdzie nie jest to bardziej prawdziwe niż w fizyce cząstek, niezależnie od tego, czy mowa o badaniach eksperymentalnych, czy rozważaniach teoretycznych. Zamiast grzęznąć w długich listach nazwisk, zdecydowałem się skupić na wielkich tematach aktualnie prowadzonych badań.

Nie jest też możliwe, aby podziękować wszystkim osobom, które były zaangażowane w powstanie tej książki. Z omówionymi dalej ideami stykałem się w mojej osobistej karierze naukowej, jakąś rolę zatem odegrał każdy, z kim pracowałem, każdy, z kim rozmawiałem o bozonie Higgsa przy kawie. Proces spisywania wszystkich tych doświadczeń na papierze to już zupełnie inna para kaloszy, dziękuję więc mojemu redaktorowi, Wayne'owi Daviesowi, za wszelkie sugestie, dziękuję również Erice, bez której wsparcia i miłości niemal na pewno nic z tego by nie wyszło.



Model Standardowy fizyki cząstek

oddziaływanie elektromagnetyczne

oddziaływanie silne

oddziaływanie słabe

oddziaływania (bozony)

ROZDZIAŁ 1

FUNDAMENTALNA NATURA RZECZYWISTOŚCI

Zapewne przymiotnik „piękna” nie jest pierwszym, jaki przychodzi do głowy, gdy myślimy o nauce, choćby z tego powodu, że tak trudno o obiektywne standardy w tym zakresie. Wystarczy jednak zobaczyć coś, żeby wiedzieć, iż jest piękne. Miałem siedemnaście lat, gdy po raz pierwszy dostrzegłem piękno fizyki. Stało się to w momencie, gdy zauważyłem, jak za sprawą dwóch różnych idei nagle zostaje nakreślone nieoczekiwane połączenie pomiędzy dwoma pozornie całkowicie różnymi zagadnieniami, jak pewne koncepcje nieustannie, raz za razem, powracają. I najważniejsze, dostrzegłem, jak wszystko to da się wyrazić w postaci kilku prostych, lecz potężnych równań. Kiedy bada się te zagadnienia, nie sposób oprzeć się wrażeniu, że dotykamy, choćby tylko przez krótką chwilę, głębszej prawdy o otaczającym nas świecie.

Historia rozwoju tych idei jest opowieścią o ludzkiej kreatywności i nieskrępowanej wyobraźni, przeplataną przemianami w kulturze i polityce, usianą błędami i szczęśliwymi zwrotami losu, naznaczoną ślepymi zaułkami i przełomami. Piękno nauki to jednak coś więcej niż zachwyt: pojedyncze równanie naprawdę może powiedzieć nam o Wszechświecie coś, co jest równie prawdziwe dzisiaj, jak było prawdziwe miliardy lat temu, i może nam powiedzieć, co wydarzy się w przyszłości mierzonej w miliardach lat.

Obraz wciąż nie jest kompletny i w przyszłości naukowcy będą kontynuowali dzieło objaśniania cudów otaczającego nas świata. Fizyka cząstek stanowi chyba najbardziej ekstremalną część tego

zadania, jest bowiem próbą zrozumienia Wszechświata dzięki badaniu najmniejszych jego elementów – cząstek elementarnych. Najmniejszych składników materii, stanowiących podstawowy materiał budulcowy, tworzący was, mnie i cały świat. Te same cząstki składają się na Słońce, całą naszą Galaktykę i miliardy innych galaktyk. Istniały niemal przez całą historię Wszechświata.

Właśnie o tych cząstkach piszę w książce. To opowieść o tym, czym są, jak się zachowują, opowieść o możliwościach, które istnieją w świecie wokół nas. To również opowieść o tym, skąd wzięły się wszystkie te cząstki, jak wszystko się zaczęło i jaki może mieć koniec. Są to jedne z najpoważniejszych pytań, jakie można zadać, a poszukiwanie na nie odpowiedzi doprowadziło do nakreślenia obrazu Wszechświata dziwniejszego, niż mogliśmy sobie wyobrażać. To opowieść o tym, co wiemy, jak też o tym, czego jeszcze nie wiemy, i naszym dążeniu do poszerzenia wiedzy. To opowieść o kwarkach i leptonach, bozonach i symetriach, a także o największym eksperymencie w historii badań najmniejszych składników materii, jakie udało nam się do tej pory odkryć.

Eksperymenty odgrywają bezwzględnie kluczową rolę w tej opowieści. Możemy zrozumieć Wszechświat tylko dzięki dokonywaniu pomiarów jego parametrów. Eksperymenty, które opiszę, mieszczą się na samym szczycie skali przedsięwzięć – na przykład Wielki Zderzacz Hadronów, ogromny akcelerator cząstek o długości 27 kilometrów, w którym badane są najbardziej ekstremalne warunki, jakie kiedykolwiek zostały stworzone w laboratorium naukowym – ale są wśród nich też mniej znane, choćby olbrzymi zbiornik wypełniony płynnym detergentem, ulokowany w opuszczonej kopalni w Dakocie Południowej, mający badać wnętrze Słońca. Trwające ponad sto lat badania doprowadziły do ujawnienia całego zoo egzotycznych cząstek i sformułowania najbardziej udanej teorii naukowej, jaką kiedykolwiek opracowano: Modelu Standardowego. Opisuje on zachowanie cząstek i ich oddziaływania, a także objaśnia wszystko – od procesów formowania się atomów i reakcji syntezy we wnętrzu Słońca po sposób, w jaki cząstki te kształtują otaczający nas świat. Symbolem autentycznego sukcesu Modelu Standardowego

jest to, że trafnie przewidział wynik każdego eksperymentu, jaki do tej pory byliśmy w stanie wykonać.

Co się tyczy mojej osoby, to długo po tym, gdy połknąłem bakcyla fizyki, zdecydowałem się na karierę w dziedzinie fizyki wysokich energii, w ośrodkach dysponujących najwydajniejszymi akceleratorami na świecie, gdzie zająłem się wyszukiwaniem nowych sposobów na testowanie Modelu Standardowego w coraz to bardziej ekstremalnych warunkach. Teraz, będąc wykładowcą na wydziale Eksperymentalnej Fizyki Cząstek w University College London, miałem szczęście pracować w Wielkim Zderzaczu Hadronów przy eksperymencie ATLAS, kiedy w 2012 roku znaleźliśmy odpowiedź na ostatnie pytanie dotyczące Modelu Standardowego. W końcu został odkryty ostatni element teorii, którego istnienie przewidziano blisko czterdzieści lat wcześniej i którego od tamtej chwili gorączkowo poszukiwano: bozon Higgsa. U zarania cząstka ta była manifestacją matematycznej sztuczki, lecz ostatecznie stała się kluczem do całej teorii – autentycznie spaja ona Model Standardowy, a jej odkrycie odsłania głębsze zasady rządzące zachowaniem Wszechświata.

Żyjemy w złotej epoce fizyki cząstek, gdyż dysponujemy największym narzędziem badawczym, dzięki któremu przesuwamy granice ludzkiej wiedzy. Najbardziej ekscytujące jest jednak to, że być może znajdujemy się u progu całkowicie nowego odkrycia, znacznie ważniejszego niż bozon Higgsa, odkrycia, które może doprowadzić do nowej rewolucji w postrzeganiu Wszechświata i naszego w nim miejsca.

Świat atomowy

Zanim zajmiemy się rewolucjonizowaniem fizyki, powinienem przedstawić głównych aktorów tego przedstawienia, podstawowe elementy budulcowe Wszechświata i siły, które decydują o ich ruchu. Opowieść zaczyna się więc od atomów.

W szkole uczymy się, że wszystko zbudowane jest z atomów, jednak jeśli się nad tym zastanowić, myśl ta potrafi wprawić

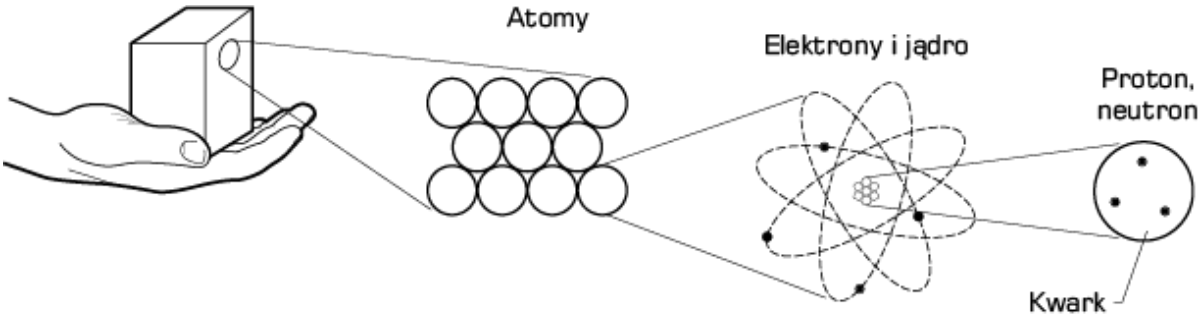
człowieka w niemałe zdumienie. Cała ta oszałamiająca różnorodność materii tworzącej świat wokół nas, na którą składają się ciała stałe, takie jak ta książka, ciecze, na przykład woda, wszystkie stworzenia na Ziemi i powietrze, którym oddychamy, wszystko to zbudowane jest z atomów. Nie dostrzegamy ich tylko dlatego, że są tak małe. Weźmy dowolne, zwyczajne ciało fizyczne, choćby kartkę papieru, i zacznijmy je ciąć. Otrzymamy mniejsze skrawki papieru – długości centymetra, milimetra, ułamka milimetra. Jeśli mielibyśmy magiczny nóż, pozwalający kontynuować cięcie na jeszcze mniejsze fragmenty, doszlibyśmy w pewnym momencie do skrawka złożonego z jednej cząsteczki, a po kolejnym cięciu mielibyśmy już atomy. Atomy są malutkie – na linii o szerokości włosa zmieściłoby się ich około miliona.

Współczesne pojęcie atomu rodziło się w XIX wieku, gdy zebrano silne, przemawiające za nim dowody eksperymentalne, od ruchów Browna (widoczne pod mikroskopem drgania drobnych pyłków roślin, trącanych przez niedostrzegalne cząsteczki wody), przez zachowanie gazów, po sposoby, w jakie różne pierwiastki chemiczne się łączą, aby utworzyć nowe związki. We wszystkich tych eksperymentach atomy zdają się zachowywać jak małe kulki, co znalazło odzwierciedlenie w znaczeniu słowa „atom”, pochodzącego od greckiego wyrazu oznaczającego coś niepodzielnego. Stanowi to ukłon w stronę starożytnej tradycji filozoficznej, zgodnie z którą budowa Wszechświata opiera się na podstawowych, niepodzielnych elementach. Istnieją różne rodzaje atomów i mogą one łączyć się z sobą, aby utworzyć cząsteczki, takie jak choćby cząsteczka wody, H_2O, składająca się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu. Cząsteczki mogą się łączyć, tworząc różne substancje, na przykład wtedy, gdy cząsteczki wody zamieniają się w lód. Atomy i cząsteczki znajdują się w nieustannym ruchu i zderzają się z sobą. Postrzegamy ten ruch jako ciśnienie i temperaturę: więcej zderzeń przekłada się na większe ciśnienie, większa prędkość zderzeń oznacza wyższą temperaturę.

Jeżeli atomy zachowują się jak małe kulki, to muszą być małymi ciałami stałymi, zlepionymi z czegoś, toteż sensownie jest zapytać,

czym jest to coś... w końcu chodzi o poszukiwanie fundamentalnej natury rzeczywistości! Atomy są jednak o wiele za małe, aby obserwować je bezpośrednio, toteż dopiero na początku XX wieku przeprowadzono eksperymenty, które pozwoliły dowiedzieć się o nich nieco więcej. Obecnie wiemy, że wcale nie są one niepodzielne, ale składają się z chmury elektronów krążących wokół małego, ciężkiego jądra, zbudowanego z protonów i neutronów – trochę jak planety krążące wokół Słońca w Układzie Słonecznym. Opierając się na tej analogii, możemy powiedzieć, że skoro nasz Układ Słoneczny zawiera osiem planet, to możemy porównać go do atomu z ośmioma elektronami, czyli do atomu tlenu. Jeśli powiększylibyśmy atom tlenu milion miliardów miliardów razy, jądro miałoby mniej więcej rozmiary Słońca, a reszta atomu wyglądem przypominałaby Układ Słoneczny, tylko nieco większy – najbliższe jądra elektrony znajdowałyby się odrobinę za orbitą Jowisza, natomiast najdalsze – daleko za orbitą Neptuna. Układ Słoneczny to kilka planet rozłożonych na milionach kilometrów próżni kosmicznej, podobnie atom to kilka elektronów krążących wokół położonego centralnie malutkiego jądra atomowego. Jest to jedna z najbardziej zaskakujących informacji na temat atomów: są one niemal całkowicie puste, co nie zmienia faktu, że mogą trzymać się razem i tworzyć wszystkie ciała stałe z naszego otoczenia. Jest to możliwe dzięki oddziaływaniu, jakie zachodzi pomiędzy sąsiadującymi z sobą atomami, co stanowi pierwszą wskazówkę, iż cząstki są ważne, ale tym, co naprawdę się liczy, są zachodzące między nimi oddziaływania.

Skoro już zapytaliśmy, z czego zbudowane są atomy, możemy zadać kolejne pytanie: z czego zbudowane są cząstki znajdujące się we wnętrzu atomów? Obecnie wiemy, że protony i neutrony zbudowane są z cząstek nazywanych kwarkami. Dwa rodzaje kwarków, które nazywamy kwarkami „górnym” i „dolnym”, łączą się na dwa sposoby – górny, górny, dolny tworzą proton, natomiast dolny, dolny, górny tworzą neutron. Wszystko zbudowane jest z atomów, atomy zaś zbudowane są z tych trzech rodzajów cząstek: elektronów, kwarków górnych i kwarków dolnych.



Struktura materii, od atomów do cząstek

Według naszej obecnej wiedzy, kwarki te i elektrony są naprawdę elementarne: nie wydaje się, aby były zbudowane z czegoś mniejszego. Mogą być podstawowymi elementami budulcowymi Wszechświata.

Od atomów do cząstek

Cząstka elementarna to rzecz dość osobliwa. Weźmy taki elektron: nie jest to mała bryłka jakiejś substancji, ponieważ moglibyśmy wtedy zapytać, co to za substancja, a sam elektron straciłby status cząstki elementarnej, jeśli byłby zbudowany z czegoś innego. Elektron... po prostu jest. Nie wiemy tak naprawdę, jakie ma rozmiary, a w równaniach fizyki cząstek wszystkie cząstki elementarne traktowane są jak obiekty nieskończenie małe. Każda cząstka charakteryzowana jest przez inny zbiór własności, takich jak masa, ładunek elektryczny i tak dalej, ale nie ma wśród nich rozmiarów fizycznych.

Skoro są to tak dziwne obiekty, nie powinno być żadną niespodzianką, że zachowują się dziwnie: prosperują w niezwykłym świecie mechaniki kwantowej. Teoria ta była rozwijana w latach dwudziestych XX wieku i przyniosła prawdziwą rewolucję w naszym rozumieniu Wszechświata. Opisuje ona zachowanie cząstek, które mocno różni się od wszystkiego, co znamy z codziennego

doświadczenia. O mechanice kwantowej, losowości i nieoznaczoności, za sprawą których cząstki tak dziwnie się zachowują, piszę w rozdziale 2.

Po części prawdziwa natura cząstek elementarnych wciąż pozostaje zagadką. Czasami zachowują się one jak małe kulki, innym razem są niczym niewyraźna chmura, jakby wokoło latała malutka, nieznośna mucha. Uwięzienie elektronu na orbicie wokół jądra atomu przypomina schwytanie takiej muchy do butelki – będzie ona miotała się od ściany do ściany naczynia, co zupełnie nie jest podobne do ruchu planet w Układzie Słonecznym, które grzecznie poruszają się po regularnych orbitach. Niepowodzenie planetarnego modelu atomu było jednak tylko pierwszą z szeregu niespodzianek związanych z cząstkami elementarnymi, które potrafią odbywać podróże w czasie w przeszłość, naginać prawa fizyki, materializować się z niebytu i przemieniać w zupełnie inne cząstki.

Podczas gdy wszystkie cząstki elementarne zachowują się dziwnie, przynajmniej część ich cech jest jednakowa i dzięki tym podobieństwom możemy ów subatomowy świat trochę uporządkować. Elektrony są przykładem cząstek, które nazywamy fermionami, na cześć Enrica Fermiego (którego uhonorowano nazwą teleskopu kosmicznego, laboratorium fizyki cząstek, pierwiastka chemicznego, kilku ulic i reaktorów jądrowych). Znamy 12 różnych fermionów, wśród których znajdują się elektron oraz kwarki górny i dolny, czyli „cząstki materii", z których zbudowane są wszelkie substancje we Wszechświecie. Podstawową własnością wszystkich fermionów jest to, że ich rozmyte chmury nie nakładają się na siebie, lecz układają się raczej jedne na drugich niczym małe plastykowe klocki – taki rozkład elektronów w atomach skutkuje tym, że pierwiastki chemiczne różnią się własnościami chemicznymi, a także przyczynia się do tego, że możliwe jest budowanie przez substancje struktur otaczającego nas świata.

Te fundamentalnie dziwne cząstki tworzą wszystkie ciała fizyczne wokół nas, lecz jednocześnie niezwykle trudno jest je zidentyfikować. Są to obiekty bezwymiarowe, lecz mimo to zajmują miejsce w przestrzeni. Zderzamy je w akceleratorach cząstek, aby badać ich zachowanie, ale im bliżej im się przyglądamy, tym dziwniejsze się

wydają. Na następnych stronach omówię część tej aury osobliwości i opiszę, jakie wynikają stąd wnioski na temat natury na jej najbardziej fundamentalnym poziomie.

Siły natury

Każda cząstka jest fascynująca, lecz to siły napędzają mechanizmy świata. Są nam lepiej znane, pod wieloma względami, codziennie bowiem doświadczamy działania grawitacji. Uważamy za coś oczywistego, że wypuszczony z ręki przedmiot niechybnie spadnie. Isaac Newton zdał sobie sprawę z tego, że siła, która sprawia, iż jabłko spada z drzewa, jest tą samą, która utrzymuje Księżyc na orbicie wokół Ziemi i planety na ich torach wokół Słońca. Ta siła to grawitacja.

Inną ważną siłą, kształtującą obraz naszego świata, jest elektromagnetyzm. Zwykle mówimy albo o elektryczności, albo o magnetyzmie, ale w istocie są to dwie strony tej samej monety, dwa efekty wywoływane przez tę samą siłę. Elektryczność, która stanowi motor napędowy naszego nowoczesnego świata, jest blisko spokrewniona z magnetyzmem, który sprawia, że igła kompasu wskazuje kierunek północny. W zasadzie gdyby związek ten nie istniał, nie mielibyśmy dostępu do elektryczności: prąd elektryczny wytwarzany jest przez poruszające się magnesy i fakt ten wykorzystuje większość naszych elektrowni. Różnice dotyczą jedynie czynnika, który sprawia, że magnesy się poruszają; może to być wiatr lub woda, reaktor jądrowy, spalanie węgla mające na celu napędzanie turbiny parowej. Tak jak grawitacja utrzymuje w Układzie Słonecznym planety na orbicie wokół Słońca, siły elektromagnetyczne utrzymują elektrony na orbicie wokół jądra atomu. Bez nich nie byłoby materii.

Siły wydają się znajome, ale sposób, w jaki naprawdę działają, pozostaje dość zagadkowy. Jak to się dzieje, że grawitacja ściąga jabłka z drzew? Jak elektromagnetyzm utrzymuje elektrony w atomach? W XX wieku doszło do całkowitego przeformułowania

teorii odzwierciedlających nasze pojmowanie tych sił, w wyniku czego zyskaliśmy odpowiedzi na te pytania. W 1915 roku ogólna teoria względności Einsteina przypisała grawitacji rolę czynnika zakrzywiającego przestrzeń i czas. W latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku rozwinięto nową teorię elektromagnetyzmu, zapewniającą korelację z mechaniką kwantową i obrazem świata cząstek elementarnych. Taka jest natura postępu naukowego – starsze idee nie są błędne, lecz mają ograniczenia i zostają wyparte przez pogłębione objaśnienia. Ogólna teoria względności i teoria kwantowa do dziś pozostają wielkimi teoriami fizyki, ale dostarczają dwóch całkowicie odmiennych spojrzeń na to, jak działają siły. Połączenie tych idei w jedną całość, w teorii obejmującej wszystkie siły natury, wciąż pozostaje jednym z kluczowych nierozwiązanych problemów, do którego powrócę w dalszej części książki, po omówieniu kwantowej wizji świata.

Badanie świata subatomowego

Jeśli celem fizyki cząstek byłoby dostarczenie prostego opisu otaczającego nas świata, moglibyśmy w tym miejscu zakończyć przegląd: mnóstwo można objaśnić tylko za pomocą elektronów, kwarków górnych, kwarków dolnych, elektromagnetyzmu i grawitacji. Natura ma jednak w zanadrzu znacznie więcej niespodzianek i kiedy na początku XX wieku udało nam się zajrzeć do wnętrza atomu, eksperymenty ujawniły istnienie całego subatomowego świata. Były w nim nowe kwarki. Siły, których nie doświadczamy w sposób bezpośredni. Cząstki, które, jak się zdaje, są elektronami z nadwagą. Ulotne niczym duchy neutrina. Wszystko to mogło mieć sens, pod warunkiem, że pojawi się nowy sposób myślenia o Wszechświecie. Taki klarowny obraz wyłonił się z badań dopiero na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych – znamy go pod nazwą Modelu Standardowego fizyki cząstek.

Model Standardowy przetrwał do dzisiaj dlatego, że jest naprawdę skuteczny. Ostatnim i największym poligonem doświadczalnym, gdzie

testuje się jego przewidywania, jest zlokalizowany w pobliżu Genewy w Szwajcarii i należący do CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Europejska Organizacja Badań Jądrowych) Wielki Zderzacz Hadronów (LHC, Large Hadron Collider). Zasadnicze elementy konstrukcyjne LHC znajdują się w tunelu w kształcie torusa, umieszczonym na głębokości około 100 metrów pod ziemią, gdzie wewnątrz rury, w której panuje większa pustka i niższe temperatury niż w próżni kosmicznej, cząstki subatomowe przyspieszane są do prędkości stanowiącej mniej więcej 99,999999 procent prędkości światła. Cząstki te zderzane są z sobą czołowo w czterech różnych miejscach na obwodzie torusa, gdzie zainstalowano cztery różne detektory cząstek, za pomocą których realizowane są eksperymenty ATLAS, CMS, LHCb i ALICE. Kiedy dochodzi do zderzeń, a dzieje się to ponad 40 milionów razy na sekundę, temperatura gwałtownie rośnie, aby przekroczyć bilion stopni – na drobny ułamek sekundy zostają odtworzone warunki, jakie panowały we Wszechświecie zaledwie w jednej miliardowej części sekundy po Wielkim Wybuchu.

Wyobrażenie sobie, co stało się 13,8 miliarda lat temu w Wielkim Wybuchu, jest niemal niemożliwe, lecz zdajemy sobie sprawę z tego, że w tym momencie historii cały Wszechświat był ściśnięty w malutkiej, błyskawicznie rozszerzającej się przestrzeni. Cząstki były upakowane tak ciasno, że w całym Wszechświecie dochodziło do wysokoenergetycznych zderzeń. Jeśli więc zastanawiacie się, jak to było, gdy doszło do Wielkiego Wybuchu, LHC oferuje najlepsze przybliżenie, na jakie nas obecnie stać. W zderzeniach wytwarzamy nowe, egzotyczne cząstki, które istnieją tylko przez drobny ułamek sekundy, ale to właśnie one musiały wypełniać całą przestrzeń zaraz po Wielkim Wybuchu. Zrozumienie tych cząstek nie tylko prowadzi do nakreślenia obrazu bardzo młodego Wszechświata, lecz także zawiera wskazówki na temat jego ewolucji do formy, jaką obserwujemy dzisiaj.

Fakt, że możemy to zrobić, jest dla mnie czymś niesamowitym. Uruchomienie LHC i wdrożenie wszystkich eksperymentów jest ogromnym osiągnięciem technicznym. Jestem jednym z 3000 ludzi z sześciu kontynentów pracujących przy eksperymencie ATLAS

(A Toroidal LHC ApparatuS). Porównywalna liczba naukowców zatrudniona jest przy CMS (Compact Muon Solenoid) – są to dwa największe eksperymenty. Każdy projekt angażujący tak dużo badaczy ma mocne i słabe strony (pomyślcie o liczbie spotkań, które trzeba odbyć), jednak jest to autentycznie fascynujące miejsce. Różne są historie i motywacje przybywających tu naukowców, lecz wszystkich łączy ciekawość. Ciekawość otaczającego nas świata i mechanizmów jego działania. Ciekawość zjawisk mocno wykraczających poza codzienne doświadczenie. Jest to jednak ciekawość dobrze zainwestowana: LHC jest pierwszym w dziejach instrumentem pozwalającym osiągać tak wysokie energie i jedynym miejscem na świecie, gdzie można badać, co w takich energiach się dzieje. Wszyscy pragniemy mieć swój udział w dokonywanych odkryciach, a największym do tej pory było znalezienie w 2012 roku bozonu Higgsa, ostatniego brakującego ogniwa Modelu Standardowego, o czym przekonamy się w dalszych rozdziałach książki.

Poszukiwanie

Odkrycie bozonu Higgsa istotnie zamknęło pewien rozdział w historii fizyki cząstek i obecnie piszemy nowy. W 2015 roku LHC wznowił pracę po trwającej dwa lata modernizacji, dzięki której zderza cząstki w jeszcze wyższych energiach, o kolejny krok przybliżając nas do początku Wszechświata i do odkrycia wcześniej nieznanych cząstek. Na świecie prowadzonych jest jeszcze wiele mniejszych eksperymentów, za sprawą których wprowadzane w życie są nowe idee i osiągane nowe poziomy precyzji pomiarów, co pozwala testować pomysły w sposób nieosiągalny w LHC. I wszystkie te eksperymenty są ukierunkowane na szukanie czegoś nowego. Model Standardowy może i jest bardzo udany, lecz wszyscy chcemy znaleźć punkt, w którym zawodzi.

Wiemy, że prędzej czy później musi do tego dojść, ponieważ istnieją nierozwiązane problemy – wielkie pytania, na które

odpowiedzi próżno szukać w Modelu Standardowym. Teleskopy skierowane na odległe galaktyki mówią nam, że jakimś cudem Model Standardowy zgubił 95 procent tego, co się w nich znajduje. Nie mamy pojęcia, jak grawitacja wpasowuje się w obraz świata subatomowego. Albo dlaczego w Modelu Standardowym jest 12 fermionów, podczas gdy wydaje się, że do budowy otaczającego nas świata potrzeba tylko trzech. Formułowane obecnie teorie zabierają nas w dalekie podróże myślowe i nie ma jednoznacznych wskazówek, co teraz się stanie. Później omówię niektóre z tych pomysłów, wśród których znajdują się supersymetria, dodatkowe wymiary, teoria strun i grawitacja kwantowa. Jednemu z nich może uda się połączyć wszystkie wątki Modelu Standardowego w jedną „teorię wielkiej unifikacji". Więcej, może nawet rozwinie się on w pełny obraz, dający nam podręcznik użytkownika do całego Wszechświata. W prawdziwą „teorię wszystkiego".

W tej chwili jest sprawą otwartą, co przyniesie przyszłość. Możemy być bardzo blisko teorii wszystkiego albo okaże się, że natura trzyma dla nas w zanadrzu jeszcze wiele niespodzianek – jestem przekonany, że tylko dzięki eksperymentom będziemy w stanie znaleźć odpowiedź. Kolejny przełom nie nastąpi sam, musimy wziąć się do pracy i dokonać odkrycia. Znajdujemy się w wyjątkowym punkcie historii, to czas niepohamowanej eksploracji, czas nowych danych, nowych pomiarów i otwierających się nowych kierunków. Kilka następnych lat będzie miało kluczowe znaczenie: jeżeli nie dokonamy przełomu, możemy być zmuszeni do powrotu do deski kreślarskiej – nie będzie to pierwszy raz, gdy pogłębienie naszego rozumienia Wszechświata wymaga postępu technologicznego. Równie dobrze lada chwila możemy odkryć za pomocą LHC gromadę nowych cząstek, dowiedzieć się nowych rzeczy na temat neutrin w wyniku eksperymentu SuperNEMO, prowadzonego pod Alpami francuskimi albo poznać prawdziwą naturę ciemnej materii, ujawnioną przez eksperyment LZ, realizowany głęboko we wnętrzu pewnej kopalni w Dakocie Południowej w USA.

Osobiście mam nadzieję, że stanie się coś zupełnie nieoczekiwanego, coś, co będzie wymagało radykalnej zmiany w naszym myśleniu, tak jak stało się na początku XX wieku, gdy

rozwijano mechanikę kwantową, albo czterdzieści lat później, gdy opracowano Model Standardowy. Zbliża się rewolucja w naszym pojmowaniu Wszechświata. Czas dołączyć do poszukiwań fundamentalnej natury rzeczywistości.

ROZDZIAŁ 2

WIZYTA W ZOO CZĄSTEK ELEMENTARNYCH

Jedną z najbardziej pociągających cech fizyki cząstek jest to, że badamy świat w jego najprostszej postaci, podstawowe cegiełki, będące budulcem wszelkiej materii. Gdybyśmy zdołali zrozumieć te fundamentalne cząstki, wtedy, cóż, możliwe byłoby zrozumienie wszystkiego innego we Wszechświecie. Oczywiście, to nie takie proste, bo choć znajdują się wszędzie wokół nas, cząstki elementarne wciąż pozostają dla nas pewną tajemnicą. Tak naprawdę nadal nie wiemy, czym w gruncie rzeczy są, a próby ich zrozumienia przypominają usiłowanie złożenia z sobą kawałków układanki: możemy badać zachowanie cząstek w różnych warunkach, poznawać ich właściwości i szukać wskazówek co do ich rzeczywistej natury. Pierwsze więc, co powinniśmy zrobić, to zdobyć nieco wiedzy na temat niektórych z nich, ażeby tego dokonać, musimy spędzić z nimi nieco czasu. W niniejszym rozdziale przedstawię parę znanych nam faktów, dziwacznych własności, prawdziwych dla wszystkich cząstek elementarnych, jakie są we Wszechświecie i podlegają opisowi mechaniki kwantowej.

Lata dwudzieste ubiegłego wieku stały się sceną rewolucji, jaka dokonała się w naszym rozumieniu Wszechświata. Był to fascynujący okres w historii nauki, w którym błyskotliwe młode pokolenie fizyków z całej Europy stworzyło nową teorię zwaną mechaniką kwantową. Ich nazwiska są synonimami rozwiniętych przez nich idei: Niels Bohr (model Bohra atomu wodoru), Werner Heisenberg (zasada nieoznaczoności Heisenberga), Wolfgang Pauli (zakaz Pauliego),

Erwin Schrödinger (równanie Schrödingera), Enrico Fermi (fermiony), Louis de Broglie (fale de Broglie'a) oraz Paul Dirac, angielski samotnik, który w 1928 roku odkrył pewne równanie. Zawiera ono zaledwie sześć symboli i opisuje zachowanie elektronu. Z tym że nie tylko elektronu – równanie Diraca opisuje wszystkie „fermiony", czyli cząstki materii, elektrony i kwarki, które składają się na atomy. A oto samo równanie:

Mówi ono, że masa (m) cząstki (ψ) wpływa na to, jak cząstka się porusza (fragment $i\gamma\partial$). Wydaje się zdumiewające, że coś tak eleganckiego i prostego może opisywać zachowanie każdej cząstki, jaką znajdziemy w atomie, każdego fermionu we Wszechświecie, i każdego fermionu, jaki kiedykolwiek istniał bądź będzie istniał w przyszłości. To potężne narzędzie. Język Natury w najmniejszej skali, a przynajmniej najlepszy język, jakiego udało nam się dotąd nauczyć. Równanie znajduje się na tablicy upamiętniającej Diraca w opactwie westminsterskim, w pobliżu grobu Isaaca Newtona i Karola Darwina.

Aczkolwiek, rzecz jasna, pozory mogą mylić – równanie Diraca bardzo szybko może stać się skomplikowane, ponadto pozwala na sformułowanie pewnych zaskakujących przewidywań, które dotyczą zachowania cząstek. A kiedy wyobrażam sobie cząstkę, nie myślę o równaniu, lecz posługuję się pewną mieszaniną obrazów i intuicji, która mówi mi, co cząstka może robić i jak się zachowywać. Zatem spróbuję w tym rozdziale odpowiedzieć na pytanie, co fizycy cząstek myślą, kiedy myślą o cząstkach, a ponieważ najpowszechniejszą jak dotąd odpowiedzią są diagramy Feynmana, to one będą naszymi przewodnikami po świecie kwantów.

Fizyka rysunkowa

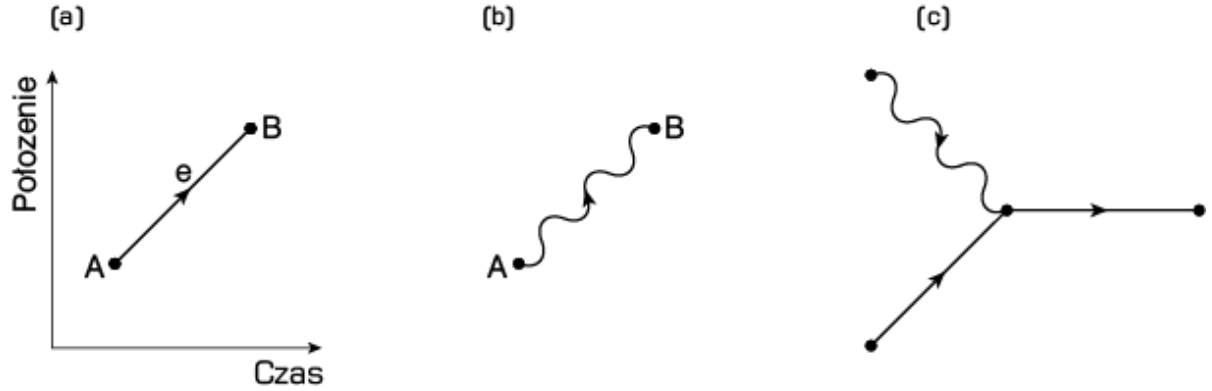
Nie możecie zagłębić się w fizykę cząstek i nie usłyszeć o Richardzie Feynmanie. Intuicja matematyczna Feynmana uczyniła z niego jednego z największych fizyków XX wieku, jest jednak znany również ze swoich dokonań w dziedzinie komunikacji naukowej, z gry na

bongosach, włamywania się do sejfów i innych błazenad. Współczesny mu Freeman Dyson po pierwszym spotkaniu z Feynmanem nazwał go „pół geniuszem, pół błaznem", potem jednak zrewidował swoje poglądy, nazywając uczonego „całym geniuszem, całym błaznem". Jednak w przeciwieństwie do innych błyskotliwych naukowców z połowy XX wieku nazwisko Feynmana wciąż regularnie pojawia się na spotkaniach naukowych w Wielkim Zderzaczu Hadronów, ponieważ walnie przyczynił się do skonstruowania teorii cząstek, którą posługujemy się dzisiaj. Prawdę mówiąc, w latach czterdziestych XX wieku powstały trzy wersje tej teorii, które rozwinęli, w większości niezależnie od siebie, Richard Feynman, Julian Schwinger i Shin'ichirō Tomonaga, wspólnie uhonorowani za tę pracę Nagrodą Nobla w 1965 roku. Trzeba było czwartego uczonego, Freemana Dysona, by zrozumieć, że wszystkie trzy teorie są równoważnymi, blisko z sobą powiązanymi opisami tej samej leżącej u podstaw rzeczywistości. Dzisiaj korzystamy z metody Feynmana, ponieważ jest bardziej przystępna i intuicyjna – oraz opiera się na obrazkach. Diagramy Feynmana rządzą się prostym zestawem reguł, dając nam całkiem realistyczny obraz tego, jak cząstki się poruszają i oddziałują z sobą, bez odwoływania się do skomplikowanych obliczeń. Niemal każda prezentacja wyników LHC opiera się na diagramach Feynmana i nie będzie wielką przesadą stwierdzenie, że wszyscy fizycy cząstek, przynajmniej od czasu do czasu, myślą w języku tych obrazków.

W niniejszym rozdziale pokażę, w jaki sposób wykorzystuje się diagramy Feynmana do badania prostych problemów: co się dzieje, kiedy dwa elektrony zderzają się z sobą? Nie brzmi to równie interesująco jak wytworzenie w LHC bozonu Higgsa, niemniej jednak dużo powie nam o tym, jak to jest możliwe. LHC zderza protony z prędkością zbliżoną do prędkości światła, całkowicie je przy tym niszcząc. Jak przekonamy się w dalszej części książki, tego rodzaju zderzeniom towarzyszy bałagan, ale możemy zacząć budować sobie wyobrażenie o tym, co się dzieje, przyglądając się najprostszej kolizji: dwóm elektronom zderzającym się czołowo. Taka sytuacja to kamień z Rosetty mechaniki kwantowej: można ją stosunkowo łatwo badać eksperymentalnie, a odkrycia rzucają światło na tajemnice

teorii kwantowej, testując rodzące się idee i przewidywania. Dostarcza nam również wzorca, według którego będziemy rozumieli niemal wszystkie cząstki i interakcje, jakie pojawią się na łamach tej książki.

Po kolei: potrzebujemy wyobrażenia o tym, jak zbudowany jest elektron. W rozdziale 1 wspominałem, że cząstki mogą robić pewne dziwne rzeczy, na razie jednak cofnijmy się do podstaw, a najprostszym wyobrażeniem dowolnej cząstki jest coś w rodzaju maciupeńkiej szklanej kulki. Wiemy już, że przedmioty w rodzaju szklanej kulki poruszają się, tocząc się po linii prostej, zatem tak właśnie zaczniemy. Pierwszy diagram Feynmana przedstawia elektron poruszający się z punktu A do punktu B i nie jest niczym innym, jak linią prostą między dwoma punktami. Czas płynie na tych diagramach z lewej strony do prawej, podczas gdy kierunek pionowy odpowiada różnym położeniom. Na razie jest dobrze (a).



(a) Diagram Feynmana dla elektronu poruszającego się z A do B.
(b) Diagram Feynmana dla fotonu poruszającego się z A do B.
(c) Diagram Feynmana dla elektronu absorbującego foton i zmieniającego kierunek.

Elektrony nie tylko się poruszają, ale również odczuwają wpływ fundamentalnych sił natury. W tym rozdziale przyjrzymy się elektromagnetyzmowi, sile odczuwanej przez wszystkie ciała, które przenoszą ładunek elektryczny. Są dwa rodzaje ładunków, dodatnie i ujemne. Ciała, które przenoszą taki sam ładunek, odpychają się,

a te, które przenoszą ładunki przeciwnych znaków, się przyciągają. Kiedy dwa elektrony zderzają się z sobą, oddziaływanie elektromagnetyczne sprawia, że się odpychają, ponieważ obydwa są naładowane ujemnie.

Chcąc się przekonać, jak to działa, potrzebujemy kwantowej wersji oddziaływania elektromagnetycznego, znanej jako elektrodynamika kwantowa (QED, *quantum electrodynamics*). W elektrodynamice kwantowej oddziaływanie elektromagnetyczne między dwoma elektronami przenoszone jest przez „nośniki oddziaływań" znane jako bozony, a bozonem stowarzyszonym z oddziaływaniem elektromagnetycznym jest cząstka światła, foton. W języku diagramów Feynmana foton poruszający się z A do B również przedstawiany jest jako linia, a żeby odróżnić go od elektronu, przypisuje mu się linię falistą oraz symbol g, tak jak to przedstawiono na diagramie (b). (Weźcie pod uwagę, że to nie jest to samo g, które pojawiło się w równaniu Diraca; w fizyce tak często używa się liter greckiego alfabetu, że nieunikniony staje się pewien recykling!)

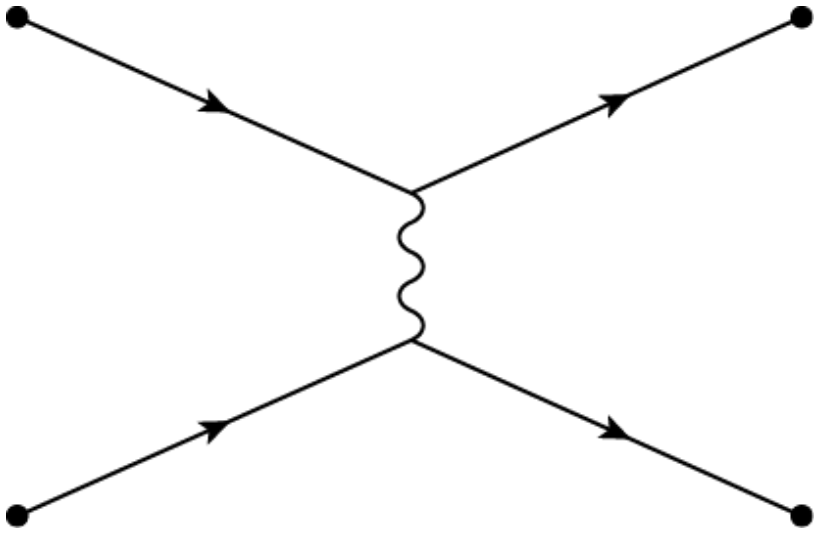
Aby pojąć, w jaki sposób fotony mogą przenosić oddziaływanie, wyobraźcie sobie dwóch ludzi stojących na deskorolkach. Jeżeli jeden z nich rzuci przed siebie piłką, w efekcie sam pojedzie do tyłu. To zasada zachowania pędu. Jeżeli drugi człowiek złapie piłkę, również zostanie wprawiony w ruch, tym razem zgodnie z kierunkiem ruchu piłki. Gdy nasi dwaj ochotnicy będą rzucać jeden drugiemu piłkę, zaczną oddalać się od siebie. Tak właśnie zderzają się dwa elektrony: mogą wymienić się fotonem i zacząć się oddalać od siebie.

Możliwe jest również, że w wyniku wymiany fotonów dwie cząstki zaczną się do siebie zbliżać. Jeśli człowiek na deskorolce 1 rzuci bumerang w kierunku przeciwnym do człowieka na deskorolce 2, zacznie się do niego zbliżać. Bumerang zatoczy łuk i znajdzie się za człowiekiem na deskorolce 2, zatem kiedy ten go chwyci, również zacznie poruszać się w kierunku człowieka na deskorolce 1. Wobec tego, rzucając piłką, nasi deskorolkarze mogą się odpychać, a rzucając bumerangiem – przyciągać. W chromodynamice kwantowej fotony mogą odgrywać rolę bumerangu, popychając

cząstki o różnych ładunkach ku sobie, albo piłki, powodując, że cząstki o tych samych ładunkach będą się odpychać.

Chcąc dokończyć ten obraz, musimy do naszych diagramów Feynmana dodać jeszcze jeden składnik: jak pokazano na trzecim z kolei rysunku (c), elektrony emitujące lub absorbujące fotony reprezentowane są przez „wierzchołki”, w których spotykają się linie elektronu i fotonu.

Mamy już wszystko, co potrzebne, żeby wyjaśnić, co się dzieje, kiedy zderzają się dwa elektrony – dochodzi do wymiany fotonu – i możemy przedstawić to w postaci diagramu Feynmana. Czytając diagram od lewej do prawej, możemy prześledzić sekwencję zdarzeń: proste linie przedstawiają zbliżające się do siebie elektrony, następuje emisja fotonu, absorpcja fotonu i elektrony odbijają się od siebie.



Dwa elektrony odbijają się od siebie przez wymianę fotonu.

Każdemu elementowi diagramu odpowiada realny kawałek matematyki, a składając je z sobą, możemy zbudować równanie dające pełny opis zderzenia. Wykonanie tych obliczeń jest już pewnym wyzwaniem, lecz narysowanie diagramu Feynmana, który wskaże nam, jakie działania wykonać, jest całkiem łatwe.

Choć powyższy przykład dotyczy elektronów, w ten sam sposób można przedstawić dowolne naładowane cząstki elementarne: jako linię prostą w diagramie Feynmana. Posługując się tymi trzema komponentami – poruszającą się cząstką, poruszającym się fotonem, wierzchołkiem – da się zbudować pełną teorię chromodynamiki kwantowej. Można je zestawiać w dowolny sposób, ilustrując każde możliwe oddziaływanie elektromagnetyczne, a wszystkie te oddziaływania obejmują cząstki wymieniające fotony. Nie będzie przesady w stwierdzeniu, że fotony spajają z sobą cały świat: przyciąganie elektromagnetyczne w atomie utrzymuje elektrony na orbitach wokół protonów, a mimo że atomy to niemal pusta przestrzeń, odpychanie elektromagnetyczne elektronów w sąsiednich atomach nie dopuszcza, żeby zwyczajnie przechodziły przez siebie nawzajem. Trudno sobie wyobrazić, jak wyglądałby świat bez fotonów – gdybym próbował klasnąć w dłonie, przeniknęłyby jedna przez drugą bez najmniejszego odgłosu! Przede wszystkim jednak bez fotonów w ogóle nie byłoby atomów. Świat, jaki znamy, po prostu by nie istniał.

Większość oddziaływań elektromagnetycznych przebiega w sposób bardzo skomplikowany, angażując niezliczoną liczbę fotonów: klaśnięcie w dłonie obejmuje biliony bilionów odpychających się elektronów i narysowanie odpowiedniego diagramu Feynmana wymagałoby mnóstwa czasu. Stąd elektrodynamika kwantowa, QED, najbardziej fundamentalna postać teorii, wykorzystywana jest tylko w stosunkowo prostych przykładach, takich jak zderzenie dwóch elektronów. W bardziej skomplikowanych sytuacjach w obliczeniach stosuje się przybliżenia w rodzaju pól elektrycznych, niemniej jednak w ostatecznym rozrachunku wszystko sprowadza się do QED. To teoria, która wyjaśnia, w jaki sposób światło odbija się od lustra, jak zostaje wytworzona i dostarczona do naszych domów elektryczność oraz jak działa cała nowoczesna elektronika. Przewidywania QED zostały przetestowane z dokładnością do bilionowego miejsca po przecinku, co czyni z niej najbardziej skrupulatnie sprawdzoną teorię w historii nauki. A jej prognozy zawsze okazywały się poprawne: jedna z najpotężniejszych teorii rzeczywiście może opierać się na obrazkach!

Rzucając kostką

Jeżeli kiedykolwiek graliście w kręgle, to wiecie, że są różne rodzaje zderzeń: muśnięcie przewracające jeden kręgiel albo solidne uderzenie dające *strike*. Pytanie brzmi zatem: czy gdy zderzamy z sobą dwa elektrony, jest to zaledwie muśnięcie, które nieznacznie zmienia ich kierunek ruchu, czy też solidne uderzenie, w wyniku którego elektrony odbijają się od siebie, jak po spotkaniu z twardym murem? Diagram Feynmana, będący tylko rysunkiem, nie precyzuje tego: foton pośrodku może nieść niewielką energię w razie delikatnego muśnięcia i mnóstwo energii w razie zderzenia czołowego. Odpowiedź kryje się w leżącej u podstaw matematyce.

I tutaj właśnie zaczynają się pojawiać pewne nietypowe fakty z zakresu mechaniki kwantowej. W rzeczywistości jedyne, co możemy obliczyć, to prawdopodobieństwa: w jakim stopniu jest możliwe to, że dwa elektrony zaledwie musną się wzajemnie, a w jakim, że całkowicie zmienią kierunek po „twardym" zderzeniu, ewentualnie jak prawdopodobne są wszelkie sytuacje pośrednie. Nie możemy stwierdzić na pewno, która z nich rzeczywiście zajdzie, kiedy spotkają się dwa elektrony. Być może matematyka mówi nam, że jest 80 procent szans na muśnięcie i 20 procent szans na twardą kolizję. Kiedy przeprowadzimy eksperyment, podczas którego będziemy wciąż zderzać i zderzać z sobą elektrony, przekonamy się, że te liczby dokładnie oddają rzeczywistość: średnio 2 na 10 zderzeń będzie twardymi kolizjami – gdybyż równie często udawało mi się trafić *strike'a* w kręglach! Problem w tym, że tak jak w kręglach nie potrafimy zawczasu przewidzieć, kiedy owo sporadycznie pojawiające się twarde zderzenie nastąpi. Wynik dowolnej kolizji jest przypadkowy, jednak przynajmniej w odniesieniu do elektronów pozostaje w zgodzie z prawdopodobieństwem, które potrafimy precyzyjnie obliczyć.

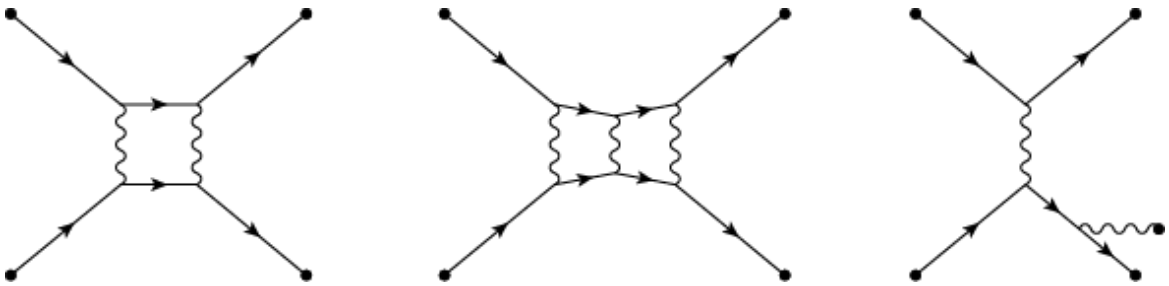
Otóż losowość w zderzeniach cząstek nie jest tym samym co losowość w moich kręglach. Gdybym mógł zmierzyć trajektorię kuli wzdłuż toru, potrafiłbym całkiem dokładnie obliczyć, czy będzie *strike*, czy też nie. Losowość w oddziaływaniach cząstek jest innego

rodzaju: nawet gdybyśmy byli w stanie zaplanować doświadczenie, w którym wiedzielibyśmy wszystko o elektronach, wynik wciąż byłby przypadkowy. Zupełnie jakby to sama kula po dotarciu do kręgli decydowała, czy zbić je wszystkie za jednym zamachem. I nie ma sposobu, żeby dowiedzieć się tego wcześniej, nieważne, jak dokładnie zmierzylibyśmy ruch kuli po torze. Ta losowość leży w sercu całej mechaniki kwantowej. Na przykład nie da się zawczasu przewidzieć, co dokładnie zajdzie podczas danego wysokoenergetycznego zderzenia w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Możemy z nieprawdopodobną wręcz precyzją obliczyć, co jest możliwe i jak prawdopodobne są te możliwości, ale potem zostaje nam tylko czekać i patrzeć, która z nich zajdzie podczas zderzenia. To zamienia fizykę cząstek w totolotka. Gdy chcemy zbadać w LHC jakąś cząstkę, na przykład bozon Higgsa, nie da się tak zaplanować zderzenia, żeby zagwarantować jej powstanie. Zamiast tego musimy przeprowadzić bardzo, bardzo wiele zderzeń i czekać na tych kilka, w których przypadkiem dojdzie do wytworzenia bozonu Higgsa. I upewnić się, że ich nie przegapimy pośród miliardów pozostałych.

U zarania teorii kwantowej wielu niepokoiło się tą przypadkowością, widząc w niej potężny krok wstecz w naszym rozumieniu Wszechświata. Wynika z niej, że nie możemy wiedzieć dokładnie, co się stanie. Nie dlatego, że nie potrafimy precyzyjnie rozwiązać równań, ani dlatego, że nie rozumiemy w pełni teorii, ale dlatego, że Wszechświat zdaje się w sposób losowy czerpać z własnej listy możliwych wyników każdego eksperymentu. Jak on to robi? Właśnie dlatego Einstein wygłosił swoją słynną uwagę: „Bóg nie gra w kości” – w rzeczywistości Wszechświat z pewnością nie działa w sposób losowy, jak gdyby cały czas wspomagał się jakimś rzutem kostką. Mniej znana riposta Bohra brzmi: „Einstein, nie mów Bogu, co ma robić!”. Mechanika kwantowa jest nieprzewidywalna i z wielu powodów niezadowalająca, ale jest realistycznym opisem natury. Nie możemy mówić naturze, jak ma się zachowywać, ale jedynie badać, jak się zachowuje. A wygląda na to, że zachowuje się w sposób losowy.

W ten czy inny sposób

Wracając do przykładu zderzenia dwóch elektronów, warto zauważyć, że to, jak odbijają się od siebie, wymieniając foton, również ma w sobie pewien element losowości. Może to tylko muśnięcie, a może twarde zderzenie. Lecz jest również inna możliwość. Stosując reguły QED, możemy narysować inny diagram Feynmana, na którym dwa elektrony oddziałują z sobą nie przez wymianę jednego fotonu, ale dwóch.



Co jeszcze może się wydarzyć, kiedy zderzają się dwa elektrony.

Ujmując to najprościej, wymiana dwóch fotonów zwiększa prawdopodobieństwo silniejszej interakcji. Wróćmy do analogii do ludzi na deskorolkach: jeżeli „wymienią" jedną piłkę, zaczną oddalać się od siebie. Po wymianie kolejnej będą oddalać się jeszcze szybciej. Im więcej fotonów wymienią dwa elektrony, tym silniej będą się odpychały. Jest również inna możliwość: elektrony mogą oddziaływać z sobą, wymieniając foton, a potem wypromieniować kolejny foton – ten ostatni oddali się, podobnie jak światło emitowane przez żarówkę. W tym wypadku energia zostaje rozdzielona między dwa elektrony i jeden foton, wobec czego obydwa elektrony nieco zwolnią.

Nie da się zawczasu przewidzieć, czy elektrony będą oddziaływały przez wymianę jednego fotonu czy dwóch, a nawet większej ich liczby. Nie da się też przewidzieć, czy wypromieniują dodatkowe fotony przed zderzeniem czy po nim. Wszystko, co możemy zrobić, to obliczyć prawdopodobieństwo każdego z tych wyników –

a prawdopodobieństwa nie są jednakowe. Rzucenie piłki czy wymiana albo wypromieniowanie fotonu mają swój koszt, a ten determinowany jest przez wielkość zwaną „stałą sprzężenia".

Stała sprzężenia mówi nam, jak dalece prawdopodobne jest, że naładowana cząstka ulegnie „sprzężeniu" albo wejdzie w oddziaływanie z fotonem, i oznaczana jest symbolem α. Ilekroć spotykają się linie elektronu i fotonu, symbol α pojawia się w każdym wierzchołku diagramu Feynmana, mówiąc nam, jakie jest prawdopodobieństwo wypromieniowania przez elektron tego dodatkowego fotonu – co przypomina nieco mówienie, jakie jest prawdopodobieństwo, że w wyniku rzutu monetą wypadnie orzeł (które wynosi 1/2). Wartość α nie jest czymś, co możemy obliczyć, musimy ją po prostu zmierzyć, i okazuje się, że wynosi niemal dokładnie 1/137. Inaczej mówiąc, tak jak szansa, że podczas rzutu monetą wypadnie orzeł, wynosi 1/2, szansa, że elektron wyemituje jeden foton, wynosi blisko 1/137. Szansa na dwa orły z rzędu wynosi 1/4 (czyli 1/2 × 1/2), a na dwa fotony z grubsza 1/19 000 (1/137 × 1/137).

Istnieje silna zależność między wartością α a siłą oddziaływania elektromagnetycznego. Gdyby α miała większą wartość, oznaczałoby to większe prawdopodobieństwo, że elektron wyemituje fotony, a więcej fotonów oznacza większą siłę odpychania między dwoma elektronami. Okazało się jednak, że wartość α jest dość mała, zatem dodatkowe fotony raczej rzadkie, a to sprawia, że z QED znacznie łatwiej się pracuje. Do poprawnej odpowiedzi nieźle zbliża nas już najprostszy możliwy diagram Feynmana dla każdego procesu, znany jako „diagram wiodący" (LO, *leading order*). Dokładniejszą odpowiedź znajdziemy, wykonując obliczenia oparte na wszystkich możliwych diagramach Feynmana z jednym dodatkowym fotonem, zwane „następnymi do wiodącego" (NLO, *next-to-leading-order*). Bardzo złożone oddziaływania angażujące wiele fotonów są niezwykle mało prawdopodobne, toteż zazwyczaj można traktować je jako zaniedbywalne – tak jak zwykle nie rozważamy mało prawdopodobnego wypadku, że zamiast na orle czy reszce rzucona moneta wyląduje na krawędzi. Jednak uwzględnienie tych bardzo rzadko spotykanych możliwości daje bardzo precyzyjną odpowiedź:

własności magnetyczne elektronu zostały obliczone z dokładnością do NNNNNLO (tak, to diagram następny do następnego, do następnego, do następnego, do następnego, do wiodącego), przy czym wzięto pod uwagę ponad 12 000 możliwych diagramów Feynmana i ponad 12 000 odrębnych obliczeń. Wynik obliczono z dokładnością przekraczającą jedną część na bilion, co można porównać do oszacowania odległości między Ziemią a Księżycem z dokładnością do grubości ludzkiego włosa.

I tu powstaje pytanie – dlaczego α ma wartość 1/137, a nie 1/2 czy 1/150 lub jakąkolwiek inną? Wydaje się, że musi istnieć po temu jakiś powód, i niektórzy szanowani naukowcy szukali go nawet w numerologii. Wolfgang Pauli, laureat Nagrody Nobla i gigant fizyki teoretycznej pierwszej połowy XX wieku, w poszukiwaniu znaczenia liczby 137 nawiązał współpracę z psychoanalitykiem Carlem Jungiem. Fascynacja tą liczbą towarzyszyła Pauliemu przez resztę życia, aż do śmierci na raka trzustki, która nastąpiła w 1958 roku w szpitalu w Zurychu... w sali nr 137.

To praktycznie nasze pierwsze spotkanie z tak zwanym parametrem swobodnym w fizyce cząstek. Oznacza to, że nie wiemy jeszcze, dlaczego α ma wartość 1/137, ale skoro już ją zmierzyliśmy, możemy wstawiać tę liczbę do równań i obliczać dokładne przewidywania tego, jak zachowają się cząstki. Być może znaczenie liczby 1/137 odsłoni się przed nami wraz z głębszym zrozumieniem Wszechświata, na razie jednak po prostu go nie znamy. W fizyce cząstek jest 26 takich parametrów swobodnych, 26 liczb, dla których nie potrafimy jeszcze wskazać wytłumaczenia – inaczej mówiąc, istnieje co najmniej 26 powodów, żeby sądzić, iż nasze obecne rozumienie fizyki cząstek jest niepełne.

„Powiedziałem mu: »Jesteś szalony«. Ale on szalony nie był”.

Do tej pory wszystko mogło wydawać się nieco obce, ale nie powinno sprawiać wrażenia czegoś naprawdę dziwnego. Elektrony i fotony zdają się podróżować po linii prostej, a cząstki naładowane oddziałują z sobą, strzelając do siebie fotonami. Zaczynając od narysowania diagramów Feynmana, możemy z dużą dokładnością obliczyć różne rodzaje możliwych interakcji. Ponieważ sprawy mogą potoczyć się na wiele sposobów, na przykład może dojść do wymiany jednego fotonu albo dwóch, i nie da się zawczasu przewidzieć, co właściwie się wydarzy, istnieje element przypadkowości, który pozwala nam obliczać jedynie prawdopodobieństwa.

Teraz nadszedł czas na naprawdę dziwne aspekty mechaniki kwantowej. Diagramy Feynmana nie przedstawiają jedynie różnych możliwych zdarzeń, które mogą zajść. Przedstawiają one różne możliwe zdarzenia, które faktycznie zachodzą. I wszystkie zachodzą w tym samym czasie. Kiedy dwa elektrony zderzają się z sobą, wymieniają jeden foton. Wymieniają również dwa fotony. I trzy. I cztery. I tak dalej. Żeby nadać temu sens, trzeba całkowicie zmienić pojęcie o tym, czym jest cząstka. Do tej pory można było myśleć o cząstkach jako o maleńkich toczących się szklanych kulkach, emitujących i absorbujących fotony. W rzeczywistości cząstki są znacznie dziwniejsze i przez większość czasu nie wiemy, co naprawdę robią. Ponieważ wygląda na to, że robią wszystko naraz.

Jednym ze sposobów radzenia sobie z tą sytuacją jest traktowanie elektronu tak, jakby rozszczepiał się na wiele kopii. Każda kopia będzie zachowywała się nieco inaczej: może inaczej się poruszać, wystrzelić dwa fotony zamiast jednego lub odbić się w innym kierunku. Swoją kopię ma każda możliwa trajektoria, którą cząstka może przemieszczać się z A do B, i każda możliwa liczba fotonów, jakie może wyemitować lub pochłonąć. Na zakończenie wszystkie kopie ponownie zbiegają się z sobą, tak że kiedy poddamy każdy elektron kolejnym pomiarom, znowu znajdziemy tylko jedną cząstkę. Jednak między pomiarami, kiedy nie patrzymy, cząstki wydają się rozszczepiać na wiele kopii i eksplorować wszystkie możliwe wersje zachowań. Chcąc poprawnie obliczyć, co może zajść podczas zderzenia, musimy zsumować wszystkie kopie i traktować elektrony

tak, jakby robiły wszystkie te rzeczy naraz. Tylko takie postępowanie daje nam realistyczny opis Wszechświata. To nie jest analogia: to opis prawdziwej matematyki. Ta wersja mechaniki kwantowej znana jest jako „całka po trajektoriach", ponieważ to właśnie robi matematyka: dodaje każdą trajektorię, jaką może obrać cząstka, każde możliwe oddziaływanie, w jakie może ona wchodzić. W przypływie intuicji Feynman dokonał wglądu w prawdziwą naturę cząstki, czym sprowokował Freemana Dysona do stwierdzenia: „Powiedziałem mu: »Jesteś szalony«. Ale on szalony nie był".

Ponieważ wyjaśnienie to tak bardzo odbiega od wszystkiego, czego doświadczamy na co dzień, warto przyjrzeć mu się nieco bliżej. Na przykład jadąc do pracy, mogę wybrać autobus lub pociąg. Mogę nie wiedzieć wcześniej, na który środek transportu się zdecyduję – być może uzależnię wybór od tego, co przyjedzie wcześniej. A kiedy dotrę do pracy, moi koledzy mogą nie wiedzieć, który pojazd wybrałem – co nie znaczy, że wybrałem obydwa! Jest oczywiste, że przyjechałem tylko jednym z nich, po prostu nie wiedzą, którym. Natomiast mechanika kwantowa jest inna. Elektronowy *ja* naprawdę rozszczepia się na dwie kopie i rusza w podróż zarówno autobusem, jak i pociągiem. Elektronowy *ja*, który wybrał autobus, również może rozszczepiać się na wiele, wiele kopii, z których każda wybierze inny z tysięcy autobusów, jeżdżących we wszystkich kierunkach i przemierzających miasto każdą możliwą trasą. Wszystkie te odmienne trasy zbiegają się w moim biurze i tylko biorąc pod uwagę każdą z nich, możemy prawidłowo wyjaśnić zachowanie elektronu.

Nawiasem mówiąc, w jeszcze innym ujęciu mechaniki kwantowej cząstki opisywane są jako fale, rozchodzące się niczym zmarszczki na powierzchni stawu albo niczym niezliczone trasy autobusów w mieście. W odniesieniu do pewnych zagadnień, takich jak elektron w atomie, teoria „dualizmu korpuskularno-falowego" jest łatwiejsza w zastosowaniu. Jednak w fizyce wysokoenergetycznych cząstek elementarnych prostszym podejściem okazuje się całka po trajektoriach Feynmana – jeśli nie z konceptualnego, to przynajmniej z matematycznego punktu widzenia – i ta wersja mechaniki kwantowej jest częścią tak zwanej kwantowej teorii pola.

O ile już wcześniej losowość mechaniki kwantowej stanowiła dla Einsteina problem, o tyle nowa idea okazuje się jeszcze gorsza. Nie tylko nie możemy dokładnie obliczyć, co będzie się działo w przyszłości, ale nie wiemy również, co właściwie działo się wcześniej – ponieważ zdarzyło się wszystko naraz. Przynajmniej tak mówi matematyka. Pytanie tylko, czy z tego, że elektrony mogą wybrać dowolną drogę, oraz z tego, że mogą wyemitować jeden, dwa lub więcej fotonów, istotnie wynika, iż robią to wszystko naraz? Cząstki są tak niewielkich rozmiarów, że nie da się poddać ich bezpośredniej obserwacji, być może zatem elektrony robią tylko jedną z tych rzeczy, a my, podobnie jak moi koledzy z biura, którzy nie widzą, czy przyjechałem pociągiem, czy autobusem, po prostu nie wiemy, co wybrały. Ten rodzaj wyjaśnienia znany jest jako teoria „zmiennych ukrytych", ponieważ mówi, że istnieje całkowicie normalne wytłumaczenie tego, co robią cząstki – problem w tym, że nie możemy go zobaczyć.

Erwin Schrödinger, którego nazwisko jest jednym z najsilniej kojarzonych z teorią kwantową, stanowczo przeciwstawiał się idei „dzieje się wszystko naraz", którą sparodiował swoim słynnym eksperymentem z kotem w pudełku. Pomysł jest następujący: kot znajduje się w pudełku razem z urządzeniem, które zawiera bryłkę uranu i fiolkę z trucizną. Uran jest radioaktywny. Z chwilą gdy urządzenie wykryje jakieś promieniowanie, uwolni truciznę i zabije kota. Rozpad radioaktywny to proces losowy, podporządkowany zasadom mechaniki kwantowej. Jeżeli potraktujemy mechanikę kwantową poważnie, wszystko powinno dziać się jednocześnie: uran emituje jakieś promieniowanie i kot umiera; uran nie emituje promieniowania i kot nie umiera. Zgodnie z mechaniką kwantową, kot jest jednocześnie żywy i martwy, a otwarcie pudełka powoduje losowy wybór jednej z tych możliwości. Wedle „rozsądniejszej" teorii zmiennych ukrytych, kot cały czas jest żywy lub cały czas martwy, a my po prostu nie wiemy, jaki jest jego stan dopóty, dopóki nie otworzymy pudełka. (Oczywiście, to tylko eksperyment myślowy, żaden kot nie ucierpiał podczas testowania mechaniki kwantowej).

W 1964 roku John Bell wymyślił eksperyment, który porównywał wyniki teorii zmiennych ukrytych i teorii „wszystko dzieje się

jednocześnie” (używając cząstek, nie kotów). Ponieważ może istnieć pewna różnica: w moim przykładzie z podróżującym po mieście kwantowym autobusem, kiedy pojazd rozszczepia się na wiele kopii, wykorzystując każdą możliwą trasę, niektóre z dróg mogą wzajemnie się wykluczać. Na przykład, jeżeli dwa autobusy spotkają się maska w maskę w wąskiej uliczce, nie będą mogły jechać dalej i wzajemnie się zablokują. W scenariuszu ze zmiennymi ukrytymi coś takiego nie może się zdarzyć, ponieważ na drodze jest tylko jeden autobus. Tu nie ma miejsca na blokowanie i wynik podróży może być nieco inny.

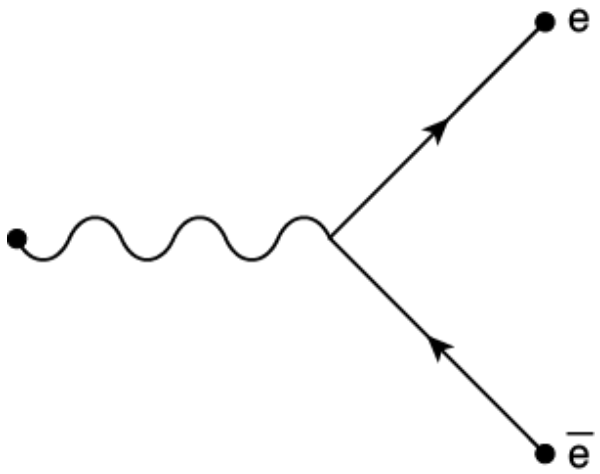
Pomysł Bella polegał na testowaniu tego blokowania, sposobu, w jaki równoczesne możliwości mogą z sobą interferować, co może zachodzić tylko w wersji kwantowej. W 2015 roku wyniki nowego eksperymentu ostatecznie wykluczyły wszelkie możliwe luki. Z jakim skutkiem? Teoria kwantowa jest poprawna. Nie ma żadnych zmiennych ukrytych. Cząstki egzystują w tych dziwacznych stanach, w których wszystkie możliwe zdarzenia zachodzą jednocześnie, czasami znosząc się nawzajem. W praktyce te dziwaczne stany istnieją zaledwie przez ułamki sekund i zazwyczaj na bardzo małych odległościach. Znacznie mniejszych niż w eksperymencie z kotem Schrödingera, który najwyraźniej nigdy nie mógłby być jednocześnie żywy i martwy. Jednak podczas zderzeń, takich jak w LHC, które zarazem obejmują bardzo mały obszar i zachodzą w bardzo dużych prędkościach, cząstki zachowują się w swój najdziwaczniejszy sposób. Na przykład dwa protony mogą zderzyć się z sobą i wytworzyć dwa elektrony na wiele różnych sposobów. My jednak nie mamy żadnej możliwości, by się dowiedzieć, która wersja zaistniała w danym zderzeniu, ponieważ w rzeczywistości w każdym zderzeniu zachodzą wszystkie z nich. Nie dość, że Wszechświat ma charakter losowy, to jeszcze robi wszystko naraz.

Podróż w czasie i antymateria

Wiemy już, że elektrony mogą odpychać się od siebie oraz że możemy dokładnie wyliczyć, jakie jest prawdopodobieństwo tego, że

zaledwie musną się wzajemnie, a jakie, że wejdą w twarde zderzenie. Możemy przedstawić to za pomocą prostego diagramu Feynmana, na którym odbijają się, wymieniając jeden foton, bądź bardziej złożonego, na którym wymieniają dwa lub więcej fotonów, czy jakiegokolwiek innego diagramu Feynmana, który będzie spełniał zasady elektrodynamiki kwantowej. Te diagramy, choć użyteczne, są tylko skrótem. W rzeczywistości cząstki nie toczą się po liniach prostych, lecz eksplorują wszystkie możliwe trajektorie z A do B. Nie wymieniają jednego lub dwóch fotonów, lecz każdą możliwą ich kombinację. Tylko dodając do siebie wszystkie możliwości, wszystkie trajektorie i interakcje, oraz traktując je tak, jakby zachodziły w tym samym czasie, otrzymamy realistyczny opis tego, co się dzieje, gdy zderzają się z sobą elektrony.

I wierzcie mi lub nie, wszystko wynika z prostego równania Diraca, które podałem na początku rozdziału. Dirac zdał sobie również sprawę, że równanie przewiduje coś więcej: antymaterię. Jej istnienia dowodzi matematyka, ale znowu łatwiej będzie posłużyć się rysunkami Feynmana. Weźmy diagram wierzchołkowy, na którym z lewej strony biegną linie elektronu i fotonu, następnie elektron absorbuje foton i po prawej stronie mamy już tylko linię elektronu. Teraz możemy obrócić ten diagram w taki sposób, że po lewej stronie mamy nadbiegający foton, a po prawej dwie linie elektronu: jedną wchodzącą do wierzchołka i jedną wychodzącą z niego.



Odwrócony diagram wierzchołkowy przedstawia foton zamieniający się w elektron i pozyton.

Wiążą się z tym pewne problemy. Przede wszystkim dlaczego wolno tak obrócić diagram? Skoro na tych obrazkach czas płynie z lewej do prawej, a położenie zmienia się z dołu do góry, obrócenie ich zmienia sens czasu i położenia (albo przestrzeni)! Dlatego właśnie równanie Diraca jest tak wspaniałe – to ono pierwsze pozostawało w zgodzie ze szczególną teorią względności Einsteina. Relatywistyka mówi nam, że przestrzeń i czas są względne, nie istnieje absolutny układ odniesienia: ludzie mogą oglądać zdarzenia w różnej kolejności, zależnie od tego, jak względem nich się poruszają. To fascynujący temat, lecz trzeba by mu poświęcić osobną książkę! W tym miejscu wystarczy nam zapewnienie, że nie ma jednej słusznej orientacji diagramów Feynmana i obracanie ich jest OK.

Jest jednak jeszcze jeden problem. Obracając wierzchołek, przesunęliśmy linię elektronu: wchodziła do diagramu z lewej strony, teraz wchodzi z prawej. Tymczasem wędrówka z prawej strony do lewej oznacza cofanie się w czasie. Na diagramie Feynmana jest to ilustrowane strzałką wzdłuż linii, wskazującą kierunek przeciwny do kierunku upływu czasu. Pytanie, czy ma to jakiś sens fizyczny? Cóż, okazuje się, że ujemnie naładowana cząstka, która cofa się w czasie, wygląda identycznie jak dodatnio naładowana cząstka, która porusza się naprzód w czasie. Może to brzmieć dziwnie, ale kiedy ujemnie naładowana cząstka porusza się w pewnym kierunku, w miejscu, które opuszcza, jest teraz mniej ładunków ujemnych (jest więc ono bardziej dodatnie). Jak w minutniku do gotowania jajek: czy kiedy odwrócimy go do góry nogami, to piasek przesypuje się w dół, czy powietrze wchodzi do góry? Linia na odwróconym diagramie Feynmana wygląda teraz jak dodatnio naładowany elektron, zwany pozytonem. To jest antymateria.

Istnieje antymaterialna wersja każdego fermionu: antyelektrony, antykwarki, zbudowane z tych antykwarków antyprotony, i tak dalej. Oznaczamy je kreską nad symbolem cząstki (na przykład $\overline{u}$, $\overline{e}$ etc.), a na diagramie Feynmana przez rysowanie cząstki cofającej się

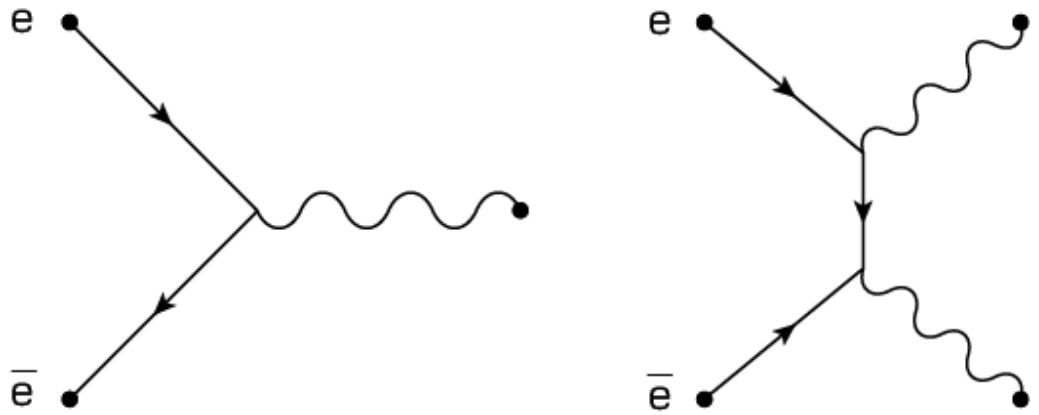
w czasie. Antymateria zachowuje się tak samo jak materia, lecz przenosi ładunek przeciwnego znaku. Pozytony poruszają się identycznie jak elektrony i podlegają wszystkim dziwnym regułom mechaniki kwantowej. A wszystko to bierze się ze zwyczajnego obrócenia diagramu wierzchołkowego QED, który już znamy. Jednak ten nowy, odwrócony diagram mówi nam coś jeszcze: foton na diagramie wchodzi z lewej strony i zamienia się w elektron i pozyton. Jeżeli foton ma wystarczająco dużo energii, może stworzyć materię i antymaterię.

Chcąc się dowiedzieć, jaka energia jest potrzebna do stworzenia antymaterii, musimy posłużyć się prawdopodobnie najbardziej znanym równaniem na świecie: $E = mc^2$. To wzór wywodzący się ze szczególnej teorii względności Einsteina, który mówi, że energia (E) i masa (m) są sobie równoważne. Trzecia wartość (c) jest prędkością światła i wyraża się bardzo dużą liczbą: niemal 300 milionów metrów na sekundę lub ponad miliard kilometrów na godzinę. Podnieście tę liczbę do kwadratu (pomnóżcie przez nią samą), a równanie stanie się cokolwiek niewyważone. Wynika z niego, że odrobinę masy można zamienić w niezwykle dużą ilość energii. Albo że stworzenie odrobiny masy wymaga ogromnych ilości energii.

W wypadku fotonu kreującego elektron i pozyton musimy wstawić do równania dwukrotną masę elektronu (elektron i pozyton mają taką samą masę), co daje potrzebną energię rzędu jednej dziesiątej z jednej milionowej z jednej milionowej części dżula: 10^{-13} dżula (ponieważ w tej książce pojawiają się niezwykle ekstremalne liczby, od czasu do czasu zapisuję je powyższym skrótem. Jeżeli taki zapis nie jest wam znany, w Dodatku 1 znajdziecie krótki przewodnik). Dla porównania: jedna kaloria to 4000 dżuli, a jeden banan daje około 100 kalorii. Inaczej mówiąc, to doprawdy niewielka ilość energii, lecz jest ona skoncentrowana w pojedynczym fotonie. I tak jak jedna osoba mająca milion funtów to nie to samo co milion osób mających po jednym funcie, skoncentrowanie nawet tak małej energii w jednym fotonie czyni go dość wyjątkowym. Fotony światła widzialnego nie mają nawet w przybliżeniu tak dużej energii, żeby

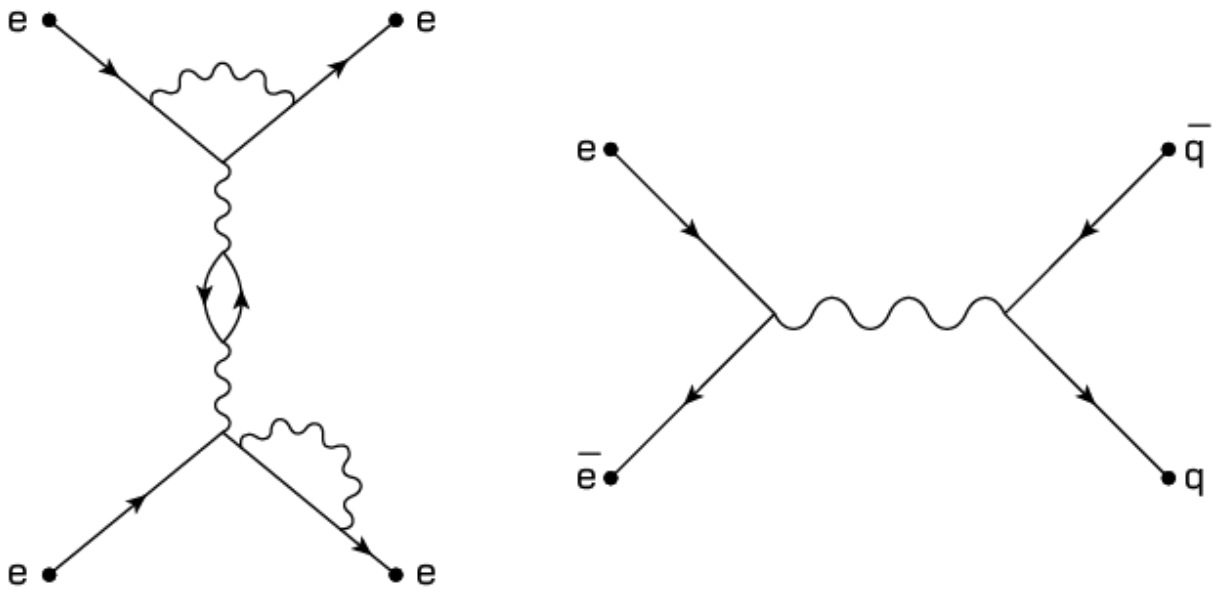
stworzyć antymaterię (zapewne, to bardzo dobrze). Chcąc stworzyć elektrony z antymaterii, musimy wykroczyć poza zakres widzialny, nadfioletowy, poza promieniowanie rentgenowskie, sięgając po najbardziej energetyczne fotony, jakie znamy: promieniowanie gamma. Właśnie dlatego, że tak trudno ją stworzyć, antymateria czekała na odkrycie aż do 1932 roku!

Możemy również wziąć nasz obrócony diagram wierzchołkowy i odwrócić go w jeszcze inny sposób: jeżeli elektron i pozyton zejdą się z sobą, mogą „anihilować", zamieniając się w wysokoenergetyczny foton promieniowania gamma. Zasada ta leży u podstaw działania skanerów pozytonowej tomografii emisyjnej (PET), wykorzystywanych w medycynie do obrazowania. Ponieważ niektóre materiały radioaktywne emitują pozytony, służą za „znaczniki", których niewielkie (całkowicie bezpieczne) ilości wstrzykuje się do ciała pacjenta. Kiedy pozytony w ciele pacjenta spotkają elektrony, dochodzi do anihilacji i emisji promieniowania gamma – właściwie dwóch jego fotonów, poruszających się w przeciwnych kierunkach. Po opuszczeniu ciała pacjenta fotony zostają zarejestrowane. Śledząc promieniowanie gamma, uzyskujemy obraz obszarów, w których znajduje się znacznik, co daje lekarzowi wiedzę o przepływie krwi w ciele – informację diagnostyczną niemal niemożliwą do uzyskania w inny sposób.



Kolejny obrót wokół wierzchołka ukazuje elektron i pozyton, które anihilują, tworząc foton. Po prawej reakcja w skanerach PET, kiedy elektron i pozyton zamieniają się w dwa fotony promieniowania gamma.

Obrócony w ten sposób wierzchołek pozwala zbudować również bardziej złożone diagramy Feynmana, zawierające pętle. Foton może tymczasowo zamienić się w parę: cząstka i antycząstka. Elektrony mogą tymczasowo wyemitować foton, a w chwilę później ponownie go zaabsorbować. Im bardziej skomplikowany diagram Feynmana („następny do wiodącego” i kolejne), tym więcej pojawia się w nich pętli. Ponieważ bardzo trudno sobie z nimi poradzić, w latach trzydziestych XX wieku pętle omal nie zabiły mechaniki kwantowej, jeszcze zanim ta w ogóle zaczęła się rozwijać – powrócę do tego w rozdziale 9.



Skomplikowany diagram Feynmana z pętlami. Po prawej: zderzanie elektronów i pozytonów w akceleratorze LEP w celu stworzenia kwarków i antykwarków.

Mechanika kwantowa przewidziała coś takiego jak antymateria. Po prostu pojawiła się ona w równaniach i przez jakiś czas nie było jasne, czy powinna być traktowana poważnie, jako coś rzeczywistego, co naprawdę istnieje we Wszechświecie, czy też jako dziwaczny kawałek matematyki, który można zignorować. Dzisiaj jednak antymateria jest czymś pospolitym. Wielki Zderzacz Hadronów przyspiesza cząstki do energii kilka milionów razy większej

niż potrzebna do stworzenia pozytonów i antymateria jest produkowana niemal w każdym zderzeniu. Elektrony i pozytony są tak pospolite i zachowują się tak podobnie, że mamy skłonność do nazywania ich wspólnym mianem „elektronów".

Zanim powstał Wielki Zderzacz Hadronów, w CERN znajdował się LEP (Wielki Zderzacz Elektronowo-Pozytonowy). Ten akcelerator cząstek zderzał z sobą elektrony i pozytony, a zachodzące przy tym oddziaływania mogły obejmować anihilację materii i antymaterii prowadzącą do powstania wysokoenergetycznego fotonu, który następnie mógł z powrotem zamienić się w materię i antymaterię. Jednak cząstki powstałe na zakończenie procesu wcale nie musiały być takie same jak te, które były na początku. Mógł to być, na przykład, kwark i antykwark. Zderzające się z sobą materia i antymateria zamieniają się w energię pod postacią fotonu, on zaś z kolei zamienia się w inne cząstki, inną postać materii, która przed zderzeniem zwyczajnie nie istniała. To jakby zderzyć z sobą dwa porcelanowe wazony i otrzymać dwa wylatujące z miejsca zderzenia tostery – nie istnieje odpowiednik tego zjawiska w świecie naszych codziennych doświadczeń. Niemniej jednak elektrodynamika kwantowa przewidziała wszystkie tego typu zdarzenia i dobrze je wytłumaczyła. Prawdę mówiąc, dzisiaj jedyne, co wydaje nam się dziwne w antymaterii, to fakt, że najwyraźniej nie ma jej już we Wszechświecie... Wrócimy do tego zagadnienia w dalszej części książki!

Najbardziej precyzyjna teoria naukowa, jaką kiedykolwiek stworzono

Chciałem wyjaśnić w tym rozdziale, o czym myślą fizycy, gdy myślą o cząstkach – odpowiedzi udzielają zwykle diagramy Feynmana, rysunkowa wersja prawdziwej matematyki, która pozwala przewidzieć, jak zachowają się cząstki. Istnieją zaledwie trzy podstawowe składniki diagramów: linie proste, linie faliste

i wierzchołki (miejsca, w których schodzą się dwie linie). Posługując się ich kombinacją, możemy zilustrować rysunkiem każdy możliwy sposób wzajemnego oddziaływania cząstek. Następnie możemy przełożyć diagramy Feynmana na równania i posłużyć się nimi do znalezienia wyników. Takie są zasady QED, kwantowej postaci oddziaływania elektromagnetycznego, która jest również podstawowym wzorcem naszego pojmowania wszystkich sił natury oraz wzajemnego oddziaływania wszystkich cząstek. Generalnie rzecz biorąc, „diagram wiodący", najprostszy, jaki możecie narysować dla danego procesu, bez dodatkowych linii, jest całkiem niezłym przybliżeniem tego, co się dzieje. To jednak nie wszystko, jest też cała ta dziwaczność: fakt, że wszystko dzieje się naraz, a cząstki mogą podróżować w czasie do przodu i do tyłu. I jeżeli wszystko to zaakceptujecie, możecie wykorzystywać QED do znajdowania najdokładniejszych przewidywań w historii nauki.

Ucząc się podstaw QED, odkryłem, że to jedna z najbardziej ekscytujących i pięknych teorii w fizyce cząstek – tak prosta, a zarazem tak potężna. Tylko co takiego elektrodynamika kwantowa mówi nam o samych cząstkach? Opisuje ich zachowanie, natomiast nie mówi, czym cząstki są naprawdę. Wydaje się też, że zachowanie cząstek jest zróżnicowane. Na dużych dystansach i w długich odcinkach czasu cząstki zachowują się jak grudki materii, maleńkie szklane kulki. Natomiast na krótkich dystansach i w krótkich odcinkach czasu, czyli w warunkach panujących podczas wysokoenergetycznych zderzeń w Wielkim Zderzaczu Hadronów, ujawniają one całą kwantową dziwaczność, o której opowiadałem: rozszczepianie się na wiele kopii, eksplorowanie wszystkich trajektorii i tak dalej. Zatem czym w istocie jest cząstka? Ostatecznie za przewodnika może nam posłużyć tylko matematyka, ponieważ nigdy żadnej cząstki nie zobaczymy bezpośrednio. Przypomina to sytuację, gdy będąc w restauracji, próbujemy odgadnąć, jak ugotowano posiłek, ale nie wolno nam wejść do kuchni i zapoznać się z przepisem. Możemy tylko kosztować zupę, poddawać cząstkę pomiarom w określonej chwili. Nie zdołamy zobaczyć listy składników, czyli przyjrzeć się cząstkom podczas wykonywania wszystkich tych dziwacznych kwantowych rzeczy.

A zatem czy matematyka mechaniki kwantowej to realny, oparty na faktach opis tego, co robią cząstki, gdy nie poddajemy ich pomiarom? Czy to rzeczywisty przepis na zupę, którą jemy, prawda o tym, jak zachowuje się Wszechświat w najmniejszej skali? Cóż, z pewnością nie możemy jej zignorować. Mechanika kwantowa to jedyny działający opis Wszechświata, jaki mamy. Jest zdumiewająco precyzyjna, a jej dotychczasowe przewidywania pomyślnie przeszły wszelkie możliwe testy doświadczalne. Nie ma powrotu do prostszego obrazu świata, w którym cząstki zachowywały się grzecznie, nie rozszczepiały się na widmowe kopie samych siebie i nie podróżowały wstecz w czasie. I dopóki nie zaobserwujemy cząstek robiących rzeczy, których mechanika kwantowa nie potrafi przewidzieć, dopóty nie ma powodu sądzić, że nie jest to dobra receptura.

Jakkolwiek byśmy na to patrzyli, cząstki są z gruntu dziwnymi tworami. Całkiem możliwe, że mechanika kwantowa rzeczywiście daje nam dobrze działające przybliżenie tego, czym są naprawdę. Jednak w tej chwili daje nam ona po prostu to, czego potrzebujemy: możliwe wyniki eksperymentów. I robi to przepięknie. Bez niej nie mielibyśmy laserów, komputerów, smartfonów ani żadnej innej współczesnej elektroniki. Nie mielibyśmy skanerów MRI (obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego) ani PET. Uczeni pracują obecnie nad komputerami kwantowymi, kwantową kryptografią, spintroniką, splątaniem, teleportacją kwantową, a w przyszłości być może nad wieloma innymi zastosowaniami, które dopiero zostaną wynalezione. Zapoczątkowana przez kilku fizyków próbujących nadać sens pewnym nietypowym wynikom doświadczeń mechanika kwantowa, to dzisiaj dziedzina o zasadniczym znaczeniu dla naszego życia. Nie ma ucieczki przed tym, że jest dziwaczna, jednak większość problemów konceptualnych z nią związanych pojawia się, kiedy próbujemy interpretować rzeczywiste znaczenie matematyki, zrozumieć, co mówi nam o rzeczach, których nie możemy zmierzyć – zdarzeniach ukrytych za kurtyną. Jednakże, jak w odniesieniu do wszystkich teorii, ważne jest, by nie odbiegać zbyt daleko od rzeczywistości. Mechanika kwantowa powstała, ponieważ doświadczenia mówiły nam, że cząstki muszą zachowywać się w taki

sposób – i mechanika kwantowa będzie naszą najlepszą teorią cząstek dopóty, dopóki eksperymenty nie powiedzą nam, że nią nie jest! To będzie zatem nasz następny przystanek: przyjrzymy się eksperymentom, które badały zachowanie elektronów i otworzyły przed nami cały świat egzotycznych nowych cząstek, prowadząc do Modelu Standardowego, bozonu Higgsa i Wielkiego Zderzacza Hadronów.

ROZDZIAŁ 3

W GŁĄB MATERII

Wszechświat jest dość dziwnym i niesamowitym miejscem, o czym jednak można nie mieć pojęcia, gdy za podstawę osądu przyjąć tylko to, co widzi ludzkie oko. Nie jest niczym oczywistym, że świat składa się z atomów, ani też to, że atomy zbudowane są z elektronów krążących wokół atomowego jądra. Nie ma też nic oczywistego w tym, że elektrony te – pierwsze cząstki elementarne, na jakie natrafiliśmy – czasem zachowują się jak szklane kulki, czasem jak fale, a jeszcze kiedy indziej jak coś, co w ogóle trudno sobie wyobrazić. Oddziałują wzajemnie, wymieniając między sobą fotony. Można je wytworzyć i zniszczyć, mają też antymaterialnego partnera, pozyton. Skąd wiemy to wszystko o elektronach? Jak w wypadku większej części naszej wiedzy: udało nam się opracować sposób dokonywania pomiarów z ich udziałem.

Dzisiaj mamy złotą erę fizyki cząstek, ale nie przesłania to faktu, że badania naukowe potrafią posuwać się do przodu w prawdziwie żółwim tempie. Trzeba miesięcy, a nawet lat, aby wydobyć sensowny pomiar z lawiny danych dostarczanych przez Wielki Zderzacz Hadronów, a do przekształcenia pomysłu w konkretny wynik zwykle konieczna jest mieszanka inspiracji i determinacji. Jednak, jak powiedział Isaac Newton, nasz wzrok sięga nieco dalej, gdy stoimy na barkach gigantów, kiedy kolejne stopnie postępu dokładamy do już istniejących osiągnięć. Choć każdy wynik badań naukowych jest interesujący, to jednak z pewnością jedne wyniki są bardziej interesujące od innych. Niniejszy rozdział jest poświęcony historii jednych z najważniejszych eksperymentów i pomiarów, jakich kiedykolwiek dokonano w fizyce cząstek. To opowieść o tym, jak

nauka tworzona przez kilku badaczy posługujących się urządzeniami pomiarowymi mieszczącymi się na jednym stole laboratoryjnym przekształciła się w przedsięwzięcia realizowane przez ogromne laboratoria badawcze i gigantyczne detektory, jakimi się dzisiaj posługujemy. To też opowieść o tym, jak odkrycia dokonane w tych eksperymentach całkowicie zmieniły nasze rozumienie świata, oraz o tym, jak natura raz za razem nas zaskakuje.

Fizyka przed cząstkami

Pod koniec XIX wieku wydawało się, że w nauce już nic nowego nie da się zrobić. Na przestrzeni kilku poprzednich stuleci wypracowano zestaw praw, który objaśniał i opisywał równaniami niemal wszystko w otaczającym nas świecie: ruch planet, światło i fale elektromagnetyczne, malutkie twarde atomy, tworzące znany nam Wszechświat. Obecnie ten zestaw praw znany jest jako fizyka klasyczna.

Jednym z milowych kroków fizyki klasycznej jest dzieło Isaaca Newtona *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Matematyczne zasady filozofii naturalnej*) – w skrócie *Principia* – opublikowane w 1687 roku. To w nim znalazły się prawa ruchu, które stanowią precyzyjny matematyczny opis tego, jakżeby inaczej, jak poruszają się ciała fizyczne – co dzieje się z nimi, gdy są ciągnięte, pchane albo znajdują się pod wpływem jakiejkolwiek innej siły. Newton wprowadził też nowy rodzaj siły, którą nazwał grawitacją. Dziś uznajemy ją za coś oczywistego, lecz wówczas powiązanie ruchu spadającego jabłka z ruchem orbitalnym planet, które jawią się jako kilka plamek światła na niebie, było autentycznie ogromnym skokiem pojęciowym. Aby sformułować te prawa, Newton musiał wynaleźć nowy rodzaj matematyki: rachunek różniczkowy (jednocześnie i niezależnie, co, jak się później przekonamy, nie było jednostkowym wypadkiem, rachunek różniczkowy został wynaleziony przez niemieckiego matematyka Gottfrieda Leibniza – właśnie jego notacji obecnie używamy). Użycie słowa „prawo” sugeruje, jak

wielkie wrażenie wywarły te idee na ludziach tamtej epoki. Jeżeli jesteśmy w stanie zamknąć cały zagmatwany i skomplikowany świat w zaledwie kilku prostych równaniach, z pewnością jest to głęboki i prawdziwy komunikat. Prawo natury.

Newton zostawił jednak trochę pracy dla następców. W ślad za rewolucją przemysłową w XVIII wieku pojawiły się prawa termodynamiki, wprowadzono pojęcia entropii i pracy. W uproszczeniu chodziło o to, ile użytecznej energii można uzyskać za pomocą silnika parowego. Równolegle odnotowywano ogromne postępy w dziedzinie chemii. Teoria mówiąca, że wszystko zbudowane jest z atomów, zyskała szeroką akceptację, lecz atomy wyobrażano sobie jako małe kulki. Odkryto wiele różnych rodzajów atomów i każdy rodzaj atomu odpowiadał jednemu pierwiastkowi chemicznemu, a w 1869 roku Dmitrij Mendelejew opublikował pierwszą ogólnie przyjętą wersję układu okresowego pierwiastków, który grupował znane pierwiastki chemiczne ze względu na ich chemiczne podobieństwo i na podstawie pustych miejsc w tablicy pozwalał przewidzieć, że muszą istnieć jeszcze jakieś nieodkryte. Współczesne wersje tej tablicy są standardowym wyposażeniem każdej sali lekcyjnej przeznaczonej na nauczanie przedmiotów przyrodniczych.

Wreszcie istniały jeszcze zjawiska magnetyzmu i elektryczności statycznej. Choć znano je od tysiącleci, w latach dwudziestych XIX wieku Michael Faraday przeprowadził serię genialnych eksperymentów, w których pokazał, jak oba zjawiska są z sobą wzajemnie powiązane. Bazując na wynikach tych eksperymentów, James Clerk Maxwell stworzył w 1862 roku teorię elektromagnetyzmu. Dlaczego „teorię", a nie „prawo"? Jak w nowoczesnych teoriach, Maxwell postrzegał swoje równania bardziej jako model, opis świata, aniżeli prawdziwe zasady będące motorem napędowym Wszechświata. Jakiż jednak był to opis! Teoria Maxwella unifikowała elektryczność i magnetyzm w czterech krótkich równaniach i przewidywała istnienie fal elektromagnetycznych: pulsacji elektryczności i magnetyzmu, które przejawiają się jako fale radiowe, światło widzialne, promieniowanie gamma i wszystko, co pomiędzy nimi. Dopiero gdy z bardzo bliska przyjrzymy się falom

Maxwella, przekonamy się, że w istocie zbudowane są z cząstek, fotonów.

Fizyka klasyczna osiągnęła szczyt swoich możliwości, gdy Einstein rozwikłał pewne niespójności między elektromagnetyzmem Maxwella i prawami Newtona, co doprowadziło do sformułowania w 1905 roku szczególnej i w 1915 roku ogólnej teorii względności – teorii grawitacji, która do dzisiaj zachowuje aktualność. Kiedy Einstein publikował swoje prace, zaczęła się już rewolucja kwantowa i cała wiedza o świecie fizycznym była wywracana do góry nogami. On sam odegrał w niej kluczową rolę pierwszą pracą o fotonach z 1905 roku, aczkolwiek później nigdy nie potrafił zaakceptować tego, że piękny świat fizyki klasycznej zastąpiła nieprzewidywalność mechaniki kwantowej.

Nikt tego nie przeczuwał. Pod koniec XIX wieku fizyka objaśniała już niemal wszystko poza kilkoma mniej istotnymi zagadnieniami, wśród których z pewnością nie było nic, co nakazywałoby wypatrywać nadciągającej rewolucji. Postęp w nauce jest jednak często pochodną innowacyjnych technologii i nowe eksperymenty pozwoliły lepiej przyjrzeć się tym mniej istotnym zagadnieniom. Jedno szarpnięcie za luźne nitki fizyki klasycznej sprawiło, że zaczęła się pruć cała tkanina. Na ratunek pośpieszyły mechanika kwantowa i fizyka cząstek, luki zostały wypełnione. Proces ten trwał niemal do końca lat sześćdziesiątych XX wieku, gdy fizyka teoretyczna ostatecznie naprawdę nadgoniła zaległości i Model Standardowy zapewnił pełny opis wszystkich pomiarów uzyskiwanych w doświadczeniach. Model Standardowy przetrwał w niemal niezmienionej postaci do dzisiaj, jego przewidywania bowiem były nieustannie potwierdzane przez kolejne eksperymenty, których kulminację stanowiło odkrycie bozonu Higgsa. Był to ostatni rozdział rozciągniętej na ponad sto lat epopei, której protagoniści wykazywali się nowatorstwem i geniuszem, podczas gdy pierwszy dotyczył akceleratora cząstek, który potem znalazł się niemal w każdym salonie.

Tajemnicze promienie

Nowoczesny telewizor jest niezwykłym urządzeniem: jaskrawe kolory, wysoka rozdzielczość, a przede wszystkim – jest lekki i cienki. Nie zawsze tak było. Dawniej urządzenia te były duże, opasłe i ciężkie, wszystkie zawierały kineskop, magnetyczną lampę obrazową, szczelnie zamkniętą szklaną bańkę, z której wypompowano większość powietrza, zakończoną z jednej strony ekranem. Po przyłożeniu napięcia elektrycznego do przeciwnych krawędzi kineskopu ekran zdaje się emitować poświatę, a po zastosowaniu nowoczesnych (jak na połowę XX wieku) zdobyczy elektroniki poświatę można wytwarzać na żądanie i kontrolować w taki sposób, aby wyświetlane były ruchome obrazy.

Urządzenia będące prekursorami kineskopów skonstruowano w XIX wieku. Były raczej niewielkie i nietrwałe. Stworzenie tych pierwszych lamp próżniowych wymagało od dmuchaczy szkła i twórców instrumentów osiągnięcia kunsztu, jakiego nikt przed nimi nie reprezentował, jednak do lat siedemdziesiątych XIX wieku William Crookes udoskonalił projekt, uzyskując coś na kształt współczesnej świetlówki. Owe rury Crookesa, po podłączeniu do źródła prądu, wytwarzały na jednym końcu wyraźnie widoczne światło. Sądzono, że jest to spowodowane przez jakieś „promienie", które wydostają się z ujemnie naelektryzowanego końca (katody) i uderzają w przeciwległą ścianę lampy. Czymkolwiek były te promienie, musiały być albo całkowicie niewidzialne, albo zwyczajnie ich składniki były zdecydowanie zbyt małe, aby zaobserwować je w sposób bezpośredni. Czy to jeden z przykładów fal elektromagnetycznych Maxwella? Cząsteczki? Atomy? Nikt tego nie wiedział. Stanowiły jedną z luźnych nitek, od których miała zacząć się rewolucja.

W 1895 roku niemiecki fizyk Wilhelm Conrad Röntgen eksperymentował z rurami Crookesa i dostrzegł coś innego: w pewnych warunkach z rury zdawał się wydostawać i przemierzać całe laboratorium jeszcze inny rodzaj promieni. W przeciwieństwie do promieni katodowych ten nowy ich rodzaj z łatwością przenikał

przez niektóre ciała i mógł nawet zaczernić kliszę fotograficzną (będącą standardowym elementem wyposażenia dziewiętnastowiecznego laboratorium). Röntgen odkrył, że promienie nie przenikają przez substancje o dużej gęstości, takie jak kości, ale radzą sobie z lekkim substancjami, jakie tworzą skórę i mięśnie. Umieścił dłoń żony przed nową kliszą fotograficzną i włączył sprzęt – płyta fotograficzna została naświetlona przez promienie wszędzie, tylko nie za kośćmi ręki. Po wywołaniu kliszy z obrazem szkieletu kobieta wykrzyknęła: „Ich habe meinen Tod gesehen!" (zobaczyłam własną śmierć). W wielu krajach promienie te wciąż nazywa się rentgenowskimi i wiemy teraz, że są to wysokoenergetyczne fotony. Dla Röntgena stanowiły nierozwiązaną zagadkę, toteż nazwał je promieniami X, gdyż X jest matematycznym symbolem na oznaczenie niewiadomej.

W następnym roku, 1896, francuski fizyk Henri Becquerel odkrył, że pewne sole uranowe spontanicznie emitują jakiś rodzaj promieni, który również zostawia ślad na płytach fotograficznych. Maria Skłodowska i Pierre Curie dokonali odkrycia całkowicie nowych pierwiastków, które również emitowały promienie, i prowadzili nad nimi badania. Maria nazwała to zjawisko „promieniowaniem". Naukowcy zaczęli zdawać sobie sprawę z jego istnienia i choć promienie dostrzegano w coraz liczniejszych doświadczeniach, wciąż nie wiedziano, czym w istocie są.

W 1897 roku Joseph John (J.J.) Thomson posłużył się rurą Crookesa w serii eksperymentów, w których dokonywał pomiarów promieni katodowych. Choć z rur promieni katodowych wypompowano większość powietrza, w ich wnętrzu zostało jeszcze sporo atomów. Zagadką było, jak promienie katodowe mogły odbywać podróż przez całą długość rury i unikać odbicia w zderzeniach z tymi atomami. Uczony doszedł do wniosku, że muszą one być cząstkami i podobnie do rowerzysty skutecznie omijającego samochody na drodze w godzinach szczytu, powinny być małe, znacznie mniejsze od atomu. Thomson nazwał te malutkie cząstki „korpuskułami", lecz powszechnie przyjęto nazywać je „elektronami". Do tej chwili sądzono, że atomy są najmniejszymi, niepodzielnymi jednostkami materii, najmniejszymi elementami

budulcowymi Wszechświata. Tymczasem Thomson udowodnił, że promienie katodowe są od nich znacznie mniejsze.

Thomson był wówczas profesorem na Uniwersytecie w Cambridge. Jednym z jego studentów był młody Nowozelandczyk, Ernest Rutherford, który rozpoczął badania nad promieniami odkrytymi przez Becquerela i szybko zdał sobie sprawę, że tak naprawdę mamy w tym wypadku do czynienia z dwoma różnymi rodzajami cząstek, charakteryzującymi się różną przenikalnością przez przeszkody. Nazwał je „alfa" i „beta". Obecnie wiemy, że cząstki alfa są częścią jądra atomowego, natomiast cząstki beta to elektrony. Wówczas jednak nikt nie wiedział nawet, że atomy mają jądro – wciąż uważano, że są twardymi kulkami lub czymś na kształt ciasta z rodzynkami, w którym rolę rodzynek odgrywają elektrony Thomsona.

Nie minął rok 1909, a Rutherford zdobył Nagrodę Nobla i przeniósł się na Uniwersytet w Manchesterze, gdzie kierował eksperymentem Hansa Geigera i Ernesta Marsdena, którzy sprawdzali, co się stanie podczas uderzania cząstek alfa w próbkę złotej folii. Zgodnie z oczekiwaniami, większość cząstek przenikała przez folię, jednak po przestawieniu detektora na drugą stronę folii badacze przekonali się, że niektóre z cząstek były odbijane z powrotem w stronę ich źródła. Kilka cząstek alfa zderzało się z czymś bardzo ciężkim. To coś musiało też być bardzo małe, zważywszy na to, jak mało cząstek alfa było odbijanych. Gdyby model atomu „ciasto z rodzynkami" miał być poprawny, taki efekt zwyczajnie nie miał prawa się zdarzyć. Rutherford zrozumiał, że atom musiał raczej przypominać miniaturowy Układ Słoneczny, opisany przeze mnie w rozdziale 1: małe, ciężkie jądro w centrum i krążące wokół niego elektrony. Odbijane były nieliczne cząstki alfa, które trafiały w jądro. Większość bez zakłóceń przelatywała przez chmury elektronów.

Model atomu Rutherforda świetnie pasował do wyniku doświadczenia, ale nie dało się go objaśnić na gruncie fizyki klasycznej. Zgodnie z ówczesną wiedzą, taki planetarny atom zwyczajnie nie miał prawa istnieć, ponieważ elektron w ułamku sekundy opadłby spiralnym torem na jądro i cała struktura by się zawaliła – a wraz z nią cały świat, jaki znamy. Dowody były jednak

jednoznaczne i wyjaśnienie stabilności orbit elektronowych wymusiło napisanie od nowa fizyki cząstek subatomowych, co otworzyło drzwi do wszystkich dziwacznych zachowań, z którymi zetknęliśmy się w poprzednim rozdziale. Eksperyment Geigera–Marsdena bardziej niż jakikolwiek inny wyzwolił rewolucję kwantową.

Chmury w pudełku

Zapewne najważniejszy element wyposażenia laboratoryjnego w historii fizyki cząstek jest jednocześnie najtrudniejszy do zdobycia. Oto marzenie każdego uniwersytetu i każdego laboratorium badawczego: zebrać w jednym miejscu odpowiednio dużo niesamowicie zdolnych ludzi i zaczną dziać się nieprawdopodobne, nieoczekiwane rzeczy. W jednym znanym wypadku tak właśnie się stało, a bohaterem zdarzeń był kolejny student z laboratorium Thomsona, Charles Thomas Rees (C.T.R.) Wilson. Na początku szkolnej drogi Wilson planował zdobycie wykształcenia medycznego, ale na pewnym etapie pochłonęły go zagadnienia naukowe – ściśle z dziedziny meteorologii. W 1893 roku spędził trochę czasu w obserwatorium na szczycie Ben Nevis, gdzie zakiełkowała jago fascynacja pięknem chmur. Można sobie wyobrazić, że kiedy tam był, przyszły mu do głowy myśli typowe dla większości naukowców spełniających się zawodowo jako eksperymentatorzy: czyż nie prościej byłoby prowadzić takie badania w laboratorium? Po powrocie do Cambridge wziął się do konstruowania maszynerii do produkcji chmur.

Chmury, jak para, składają się z kropelek wody: substancji, która przeszła kondensację z gazowej pary wodnej z powrotem w stan ciekły. Dzieje się tak zwykle wówczas, gdy odparowana woda wpada w chłodniejsze warstwy powietrza, zupełnie jak w sytuacji, gdy przy oddychaniu w chłodny zimowy dzień z ust wydobywa się biała mgiełka. Chmury formują się na niebie zwykle na określonej wysokości, gdzie dochodzi do spotkania warstw powietrza o różnej temperaturze, a chłodniejsza warstwa znajduje się ponad warstwą

cieplejszą – pokonanie granicy między tymi warstwami jest często najbardziej „wyboistym” fragmentem podróży samolotem.

Aby wytworzyć chmurę, którą będzie można badać w laboratorium, Wilson chciał nasycić powietrze parą wodną, a następnie szybko je ochłodzić, wywołując kondensację pary wodnej. Osiągnął to przez gwałtowne obniżenie ciśnienia. Podobny efekt występuje, gdy rozpylamy aerozol: zawartość zbiornika jest sprężona i kiedy wydostaje się z niego, ulega błyskawicznemu schłodzeniu. W celu realizacji swego zamysłu Wilson zbudował „komorę mgłową”, która składała się ze szczelnie zamkniętego, szklanego naczynia, podłączonego do tłoka. Naczynie wypełniało powietrze nasycone parą wodną. Szybkie odciągnięcie tłoka rozprężało powietrze, które ulegało schłodzeniu. Na krótką chwilę w komorze pojawiała się chmura. I całe urządzenie mieściło się na stole.

Schładzanie to jednak jeszcze za mało: kondensacja wymaga katalizatora. Jak w napojach gazowanych: rozpuszczony w napoju gaz, dwutlenek węgla, nie ucieka w całości, potrzebuje do tego katalizatora. Wrzućcie ziarenko soli do napoju i spełni ono funkcję katalizatora – wokół kryształu będą gromadzić się cząsteczki dwutlenku węgla, toteż opadająca na dno sól zostawi za sobą ślad w postaci bąbelków uwolnionego gazu. W wypadku chmur w atmosferze funkcję katalizatora pełnią na ogół drobiny kurzu – cząsteczki wody gromadzą się wokół tych drobin, aż zrobią się na tyle duże, że wytworzy się kropla. Chmura w komorze Wilsona również wymagała podobnego katalizatora. Wilson próbował najpierw oczyścić powietrze ze wszystkich drobin i zanieczyszczeń. Spodziewał się, że po takim zabiegu chmura nie powstanie, ale ku jego zdziwieniu wcale tak nie było: wciąż się ona pojawiała. Co jednak było katalizatorem, umożliwiającym kondensację wody?

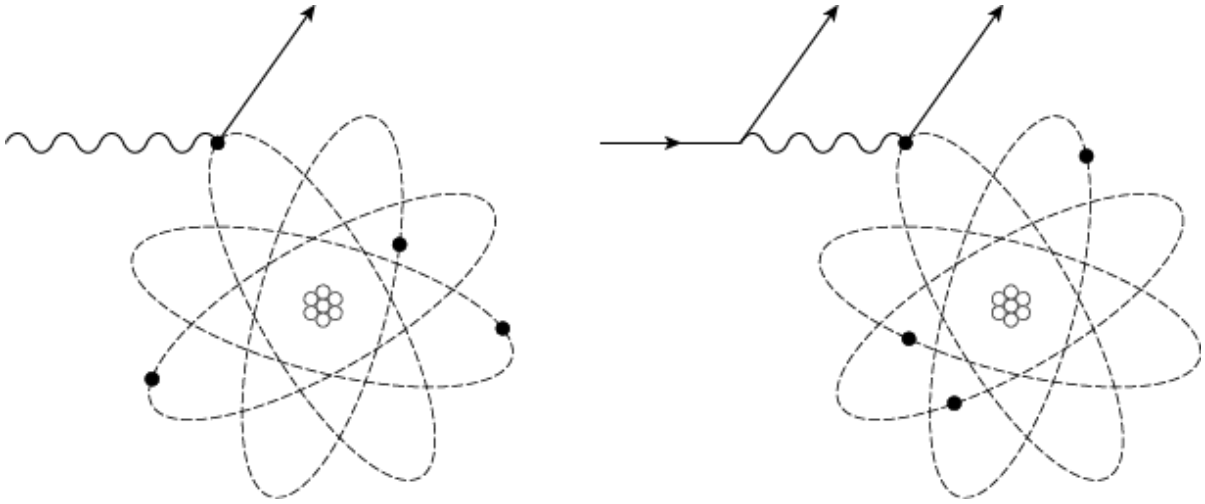
I tu, wychodząc od zagadnienia chmur, docieramy do fizyki cząstek. Wilson pracował w tym samym laboratorium co J.J. Thomson, toteż wiedział o badaniach nad promieniami i promieniowaniem. Wpadł na myśl, że być może tutaj należy szukać zalążków chmury. Ustawił komorę w pobliżu źródła promieni X i uzyskał potwierdzenie: utworzyła się znacznie gęstsza chmura. Odkrycie to mogło pójść w zapomnienie, kolejne dziesięć lat bowiem Wilson poświęcił

badaniom prawdziwych chmur. W 1911 roku udoskonalił jednak swój projekt na tyle, że można było zobaczyć mglisty ślad, podobny do smugi zostawianej na niebie przez przelatujące na dużej wysokości samoloty. Do tej pory nikt bezpośrednio nie zobaczył atomu, nie wspominając o cząstce subatomowej, kiedy więc Wilson opublikował zdjęcia śladów obserwowanych w jego komorze mgłowej, uznano to za objawienie.

Zobaczyć cząstki

Warto w tym miejscu wyjaśnić, co tu się dzieje, ponieważ ta sama podstawowa zasada kryje się za działaniem niemal każdego nowoczesnego detektora cząstek. Obecnie wiemy, czym są wszystkie te promienie: promienie X to wysokoenergetyczne fotony, cząstki alfa to fragmenty atomowego jądra, promienie katodowe i cząstki beta to elektrony. Kiedy którykolwiek z tych promieni porusza się przez powietrze, zdarza mu się uderzyć w niektóre atomy składających się na nie substancji. Ponieważ atomy to w większości chmury elektronów otaczające malutkie jądro, zwykle w zderzeniach biorą udział elektrony.

W poprzednim rozdziale wyjaśniłem, co się dzieje, gdy foton – jak ten promieniowania rentgenowskiego – natyka się na elektron: foton zostaje pochłonięty przez elektron, który zyskuje porcję energii. Porcja ta zwykle wystarcza, aby „zjonizować” atom, czyli wybić elektron z orbity, w efekcie czego uzyskujemy ujemnie naładowany elektron i dodatnio naładowany atom, inaczej jon.



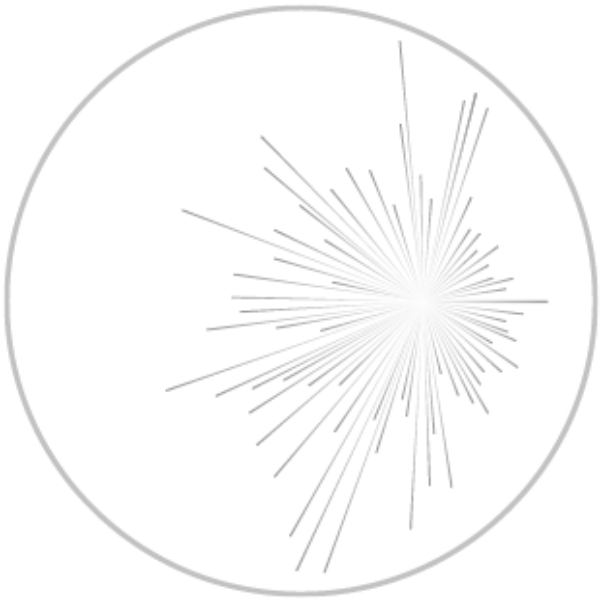
Jonizacja atomu przez promieniowanie rentgenowskie (po lewej) i przez naładowaną cząstkę (po prawej)

Podobne zjawisko dotyczy naładowanych cząstek, takich jak przyspieszane elektrony w promieniach katodowych. I znowu wiemy, co się dzieje, gdy zderzają się dwa elektrony: wymieniają jeden foton (lub więcej) i odbijają się od siebie. Naładowane cząstki, poruszające się z dużą prędkością, potrafią na swej drodze wybić z atomów wiele elektronów, niczym kule do gry w kręgle zbijające jeden kręgiel za drugim. Foton promieniowania rentgenowskiego przekazuje całą swoją energię pojedynczemu elektronowi, podczas gdy cząstki alfa lub beta zostawią za sobą ślad w postaci zjonizowanych atomów, unoszący się, aż cała energia się wyczerpie.

To jonizacja działała jak katalizator we wczesnej wersji komory mgłowej Wilsona. Cząsteczki wody zbierały się wokół jonów i ostatecznie tworzyły się krople. W 1911 roku Wilson zbudował udoskonalony model komory, pozwalający kontrolować warunki na tyle, że możliwe było rozpoznawanie pojedynczych śladów z kropelek utworzonych w wyniku jonizacji przez naładowane cząstki.

Można zbudować niedrogą komorę mgłową na bazie pustego akwarium, wykorzystując zamiast tłoka suchy lód do schłodzenia. Jest to mój ulubiony pokaz z dziedziny fizyki cząstek (w sieci można znaleźć mnóstwo wskazówek, jak samodzielnie zbudować taki model i na własne oczy zobaczyć jakieś cząstki). Kropelkowe ślady

zostawiane przez naładowane cząstki wyglądają jak nitki pajęczych sieci, unoszące się w chmurze przez kilka sekund, zanim bezpowrotnie znikną. Pierwsze wykonane przez Wilsona zdjęcia śladów zostawionych przez cząstki znajdują się obecnie w archiwum Towarzystwa Królewskiego – są niezwykle podobne do tego, co można zobaczyć we współczesnych komorach mgłowych, w których wykorzystuje się suchy lód.



Tak wyglądałyby ślady cząstek emitowanych przez źródło promieniowania, widoczne w komorze mgłowej Wilsona.

W istocie wykonane przez Wilsona zdjęcia śladów cząstek stanowiły wyzwanie dla wczesnej teorii kwantowej. W szczególności Heisenberg traktował cząstki jako coś w rodzaju matematycznej abstrakcji, coś, czego nigdy nie można obserwować w sposób bezpośredni. Tymczasem były one widoczne na zdjęciach, niczym toczące się przez komorę małe kulki, zostawiające za sobą wyraźny ślad. Jakie miało to znaczenie dla opisu kwantowego? Cóż, ślady te nie są właściwie tym, czym się wydają. Zamiast być ciągłym torem cząstki, są one w rzeczywistości rezultatem serii zderzeń zachodzących pomiędzy cząstką a różnymi atomami. Zderzenia te mogą zachodzić w odległości będącej ułamkiem milimetra, lecz dla

cząstki jest to ogromna odległość – odpowiednik pokonania przez piłkę golfową ponad kilometra, zanim dojdzie do uderzenia w cokolwiek. Kiedy widzi się ślad o długości kilku centymetrów, cząstki zdają się zachowywać jak bardzo grzeczne, konkretne ciała. Dzieje się tak dlatego, że wszystkie kwantowe dziwactwa zachodzą na bardzo małych odległościach, w pojedynczych zderzeniach.

Przez całe dziesięciolecia komora mgłowa była jedynym sposobem na zobaczenie cząstek i nawet we współczesnych detektorach do zarejestrowania cząstki wciąż wykorzystuje się jonizację. Teraz jednak, zamiast spoglądać na ślady w postaci drobnych kropelek, szukamy elektronów, które zostały wybite z atomów. Niektóre detektory zwyczajnie zliczają bezpośrednio elektrony powstałe w wyniku jonizacji. Alternatywnie elektrony mogą zostać ponownie wychwycone przez atom, czemu równocześnie towarzyszy emisja fotonu o określonej długości fali (kolorze). Ten proces ponownego wychwytywania elektronów jest odpowiedzialny za poświatę widoczną w lampie katodowej, pomarańczowy blask sodowych lamp ulicznych, jak też za różnobarwne wstęgi światła zorzy, rozświetlającej niebo nad biegunem północnym lub południowym. Niektóre detektory zliczają te fotony. Tak czy inaczej, wykryte fotony lub elektrony mówią nam, gdzie znajdowała się cząstka i jaką miała energię. Eksperyment, przy którym pracuję, ATLAS w Wielkim Zderzaczu Hadronów, dokonuje tych pomiarów za pomocą ponad 100 milionów pojedynczych sensorów, rozmieszczonych w ogromnym detektorze o wysokości ponad czterech pięter. W 1911 roku fizycy nawet nie marzyli o takiej technologii, mimo że podstawy teoretyczne niewiele różniły się od aktualnego stanu w tym zakresie.

Promienie z kosmosu

Eksperymenty Thomsona, Rutherforda i wielu innych umożliwiły na początku XX wieku otwarcie świata atomu, a stało się to dzięki tajemniczym promieniom. Jednak drzwi do fizyki egzotycznych

cząstek, które badamy dzisiaj, zostały otwarte przez jeszcze inny rodzaj promieni. Promieni z kosmosu.

Po odkryciach Marii Skłodowskiej i Pierre'a Curie wiedziano, że jest wokół nas promieniowanie jonizujące i w sposób naturalny występuje ono w pobliżu pewnych skał i minerałów. Im dalej od skał, tym mniejsze powinno być promieniowanie. Nauka polega na sprawdzaniu przypuszczeń, toteż w 1909 roku niemiecki naukowiec Theodor Wulf postanowił zmierzyć wartości promieniowania u podstawy i na szczycie wieży Eiffla. Wyniki przyniosły niespodziankę: kiedy wspinał się coraz wyżej na wieżę, wartość promieniowania nawet w drobnej części nie spadała, jak się tego spodziewał. Prace w tym kierunku kontynuował austriacki naukowiec Victor Hess, który w latach 1911–1912 za pomocą balonu dokonał pomiarów promieniowania nad Wiedniem i Republiką Czeską. Hess osiągnął wysokość 5300 metrów, gdzie temperatura spada do –20ºC, i udało mu się wykonać bardzo dokładne pomiary, które prowadziły do nieoczekiwanego wniosku: im wyżej balon się wznosił, tym więcej promieniowania jonizującego napotykał. Chcąc wykluczyć Słońce jako źródło tego promieniowania, część lotów balonu przeprowadził w porze nocnej, a nawet w trakcie częściowego zaćmienia Słońca. Promieniowanie jak było, tak było. Hess odkrył w ten sposób nowe źródło promieniowania – docierało ono do Ziemi z kosmosu. Promieniowanie kosmiczne zdawało się zupełnie inne od jakiekolwiek innego znanego w owym czasie, wszystkie bowiem miały niewielki zasięg. Promieniowanie kosmiczne przebywało wiele kilometrów w atmosferze Ziemi i przedostawało się nawet w głąb skorupy ziemskiej. Kiedy jednak informacje o tym rozeszły się po świecie, Europa pogrążyła się w chaosie pierwszej wojny światowej. Część naukowców postanowiła wspomóc wysiłki wojenne na rodzinnej ziemi, wielu zginęło w okopach.

Po wojnie fizyka odegrała rolę czynnika pojednania, gdy w 1919 roku angielski uczony Arthur Eddington podjął się sprawdzenia słuszności teorii sformułowanej niedawno przez niemieckiego naukowca, Alberta Einsteina. Wykonane przez Eddingtona w trakcie zaćmienia Słońca pomiary położenia gwiazd potwierdziły, że grawitacja zakrzywia bieg promieni świetlnych, co było jednym

z dziwnych przewidywań ogólnej teorii względności, dzięki której Einstein stał się znany na całym świecie. Zaledwie kilka lat później amerykański astronom Edwin Hubble wykonał pomiary, z których po raz pierwszy jednoznacznie wynikało, że Wszechświat jest znacznie większy niż nasza Droga Mleczna – na niebie są nie tylko gwiazdy, lecz także całe galaktyki, i jest ich mnóstwo. Kiedy wojenna zawierucha dobiegła końca, Wszechświat stał się dużo dziwniejszy i znacznie, znacznie większy.

W latach dwudziestych XX wieku wzrosło zainteresowanie promieniami odkrytymi przez Hessa, a komora mgłowa była doskonałym narzędziem do ich badania: jeśli tworzyłyby je cząstki naładowane elektrycznie, zostawiałyby wyraźne, widoczne ślady. Na uniwersytetach całego świata powielano projekt Wilsona i udoskonalano. Jedna z najważniejszych wprowadzonych zmian polegała na dodaniu silnych magnesów. Obecność pola magnetycznego powoduje, że naładowana cząstka porusza się w komorze mgłowej po zakrzywionym torze. Cząstki naładowane dodatnio i ujemnie będą poruszały się po torach zakrzywionych w przeciwnym kierunku (na przykład odchylając się w lewo i prawo), tor cząstek poruszających się wolniej będzie bardziej zakrzywiony niż poruszających się szybciej, co pozwala na wydobycie ze zdjęć komory mgłowej więcej informacji. Z tego samego powodu potężne magnesy są kluczowym elementem niemal każdego współczesnego detektora cząstek: mierząc zakrzywienie toru, można określić ładunek elektryczny i pęd cząstki.

Powodzenie w polowaniu na promienie kosmiczne wciąż jednak było kwestią szczęścia: komorę mgłową aktywowało się przez odprowadzenie tłoka, co prowadziło do schłodzenia powietrza i wytworzenia chmury, następnie wykonywało się zdjęcie powstałej chmury w celu przeprowadzenia później szczegółowej analizy. Jeśli zdarzyło się, że w chwili aktywowania komory nie przechodziło przez nią promieniowanie kosmiczne, nie było widać żadnych kropelek. Mniej więcej jedno zdjęcie na dwadzieścia przedstawiało ślad, jednak nie było wątpliwości, że są to ślady zostawione przez promieniowanie kosmiczne, które musiało się składać z cząstek naładowanych elektrycznie. W 1932 roku Carl Anderson, młody

naukowiec zatrudniony w California Institute of Technology (Caltech), zauważył w swojej komorze mgłowej dziwne ślady promieniowania kosmicznego – wydawało się, że zostały zostawione przez cząstkę o masie identycznej z masą elektronu, ale obdarzoną ładunkiem elektrycznym przeciwnego znaku, ponieważ w polu magnetycznym tor był zakrzywiany w przeciwnym kierunku. Obserwacja pasowała do dziwacznej prognozy sformułowanej przez Diraca w 1928 roku: oprócz materii istnieje jeszcze antymateria. Anderson odkrył antyelektron, znany również pod nazwą pozyton. Kosmiczne promieniowanie nie tylko składało się z cząstek, lecz także podsuwało nowe sposoby sprawdzania pewnych osobliwych przewidywań mechaniki kwantowej.

Tymczasem w Cambridge angielski fizyk Patrick Blackett opracował znacznie wydajniejszą metodę fotografowania promieniowania kosmicznego, pozwalającą aktywować komorę mgłową tylko wtedy, gdy dzieje się coś interesującego. Wokół komory rozmieścił liczniki Geigera, proste detektory promieniowania, wykorzystując je do wykrycia zbliżającego się promieniowania kosmicznego i aktywowania komory, w której chmura powstawała akurat wówczas, gdy przechodziło przez nią promieniowanie. Teraz niemal każde zdjęcie uwieczniało ślad cząstki. Blackett szybko potwierdził odkrycie pozytonu przez Andersona, a nawet udało mu się zaobserwować coś nowego, ślady „V". Odpowiadały one jednemu z wierzchołków diagramów z poprzedniego rozdziału: wysokoenergetyczny foton promieniowania gamma wpadał do komory bez zostawienia śladu, ale przekształcał się w elektron i pozyton, które odlatują w przeciwne strony, zostawiając za sobą ślad w kształcie litery V. Było to kolejne potwierdzenie słuszności przewidywań Diraca mówiących o tym, że energia (foton) przekształca się w materię i antymaterię.

Idea „aktywowania" detektorów do dzisiaj pozostaje kwestią zasadniczą. W Wielkim Zderzaczu Hadronów protony zderzają się z sobą czołowo i cząstki powstałe w wyniku zderzenia rozlatują się z prędkością bliską prędkości światła. Cząstki te przelatują przez detektor w czasie kilku nanosekund. Jeżeli detektor nie włączy się we właściwej chwili, przegapimy całość akcji. Nawet

gdy wszystko jest zsynchronizowane w sposób odpowiedni, zderzenia zachodzą z tak dużą częstotliwością (około 40 milionów w każdej sekundzie), że niemożliwe jest zarejestrowanie ich wszystkich. Decyzje o tym, czy warto rejestrować każde zderzenie, muszą być podejmowane w ułamku sekundy. Cały szereg aktywatorów szuka oznak tego, że może wydarzyć się coś interesującego, na przykład pojawienia się w części detektora wielu sygnałów. Jeśli potem jeden z aktywatorów uruchomi detektor, dane zderzenia zostaną zarejestrowane do późniejszej analizy. Gdy zaś układ aktywatorów zaprojektuje się błędnie, interesujące kolizje nie zostaną zarejestrowane i wyniki będą bezpowrotnie stracone – naprawdę jest to jeden z najważniejszych aspektów eksperymentu w dziedzinie fizyki cząstek.

„Kto to zamawiał?”

W 1936 roku, zaledwie cztery lata po udowodnieniu istnienia antymaterii, badania nad promieniowaniem kosmicznym przyniosły coś zupełnie nieoczekiwanego. W Caltechu Carl Anderson wraz ze swym pierwszym doktorantem, Sethem Neddermeyerem, kontynuował doświadczenia z komorą mgłową. Zauważyli ślad, który wyglądał tak, jakby zostawiła go cząstka znacznie cięższa od elektronu, lecz jednocześnie o wiele lżejsza od protonu. Było to coś nowego: cząstka nie była częścią atomu ani nie można było jej skojarzyć z żadnym znanym w tamtym czasie promieniowaniem. Nie istniała w otaczającym nas świecie... ale wytwarzało ją promieniowanie kosmiczne. Dzisiaj wiemy, że tą cząstką jest mion (oznaczany symbolem μ), cięższy kuzyn elektronu, ale wówczas była ona całkowitym zaskoczeniem, co amerykański laureat Nagrody Nobla I.I. Rabi żartobliwie podsumował pytaniem: „Kto to zamawiał?”. Była to pierwsza wskazówka, że Wszechświat zawiera więcej elementów niż tylko atomy i cząstki, które je tworzą.

Nie tylko sam mion wymagał wyjaśnienia, przede wszystkim wciąż nie było jasnych wskazówek, skąd bierze się promieniowanie

kosmiczne. Powstawały pewne ze wszech miar dziwne pomysły: Robert Millikan, laureat Nagrody Nobla za pomiar ładunku elektronu, głosił na poły religijne przekonanie, że promieniowanie kosmiczne to fotony będące „płaczem nowo narodzonych atomów", Bóg bowiem wciąż kontynuuje tworzenie nowej materii we Wszechświecie. Teraz wiemy, że promieniowanie kosmiczne to głównie protony, przemierzające Galaktykę z ogromną prędkością. Wiele z nich wytwarzanych jest przez supernowe – gwiazdy, które osiągnęły kres swego życia i zginęły w wybuchu będącym jednym z najgwałtowniejszych zachodzących w kosmosie zjawisk; za jego sprawą światło i materia zostały wyrzucone we wszystkich kierunkach. Kiedy protony te zderzają się z ziemską atmosferą, przyczyniają się do powstania całego deszczu nowych cząstek, podobnie jak w zderzeniu zachodzącym w LHC, ale energie osiągane w tym wypadku są czasem nawet tysiące razy większe. Z tego powodu promieniowanie kosmiczne pozostaje wdzięcznym tematem badań i powróci w rozdziale 8.

Jednak w latach trzydziestych XX wieku mion wciąż był zagadką. Jedna z teorii sugerowała, że istnieją dwa rodzaje elektronów: „czerwony" i „niebieski". Jednym z nich jest elektron, który znamy i kochamy, natomiast ten drugi przejawia dość dziwaczne zachowania, pasujące do nowej cząstki. Naginanie posiadanych zasobów wiedzy, tak aby jakoś dopasować je do nowych danych, jest czasem bardziej do przyjęcia niż zaakceptowanie zupełnie nowej rzeczywistości! Wówczas to, w 1935 roku, japoński teoretyk Hideki Yukawa stworzył model jądra atomu, który wymagał nowego rodzaju cząstki do utrzymywania go w całości. Cząstka ta nazywa się pion (i jest oznaczana symbolem π). Model przewidywał, że masa tej cząstki jest podobna do masy nowo odkrytego mionu. Może więc znaleziono właśnie tę cząstkę?

Zanim zdołano rozwikłać tę tajemnicę, wybuchła druga wojna światowa. Po dojściu nazistów do władzy Einstein i wielu innych naukowców wyjechało z Niemiec lub zostało wypędzonych. Niektórzy, jak Heisenberg, zdecydowali się zostać i albo stawić czoła chaosowi, albo związać swój los z nowym reżimem. W Wielkiej Brytanii nad ideami związanymi z bombą atomową pracował Dirac,

tymczasem w Stanach Zjednoczonych projekt Manhattan przyciągnął wielu znakomitych naukowców, w tym Feynmana, którym udało się zbudować taką bombę i w najbardziej przerażający sposób pokazać, jak wielka potęga drzemie w atomie.

Po wojnie wznowiono badania i w 1947 roku zespół z Uniwersytetu w Bristolu używał do rejestrowania promieniowania kosmicznego techniki emulsji światłoczułej, rozwiniętej przez Cecila Powella, byłego studenta Wilsona. W celu zarejestrowania promieniowania kosmicznego klisze fotograficzne wynoszono wysoko w góry lub zabierano na pokład samolotów, a potem zbierano, wywoływano i analizowano. Zespół znalazł nową cząstkę, która idealnie pasowała do przewidywanego przez Yukawę pionu. Zwracał uwagę fakt, że ślad pionu wygląda szczególnie: czasem pion spontanicznie rozpadał się na lżejszą cząstkę (mion) i jednocześnie zmieniał kierunek. Ostateczny efekt wyglądał tak, jakby dwa ślady łączyły się na styk.

Blackett przebywał teraz w Manchesterze, gdzie George Rochester i Clifford Butler podjęli badania z wykorzystaniem komory mgłowej i dokonali kolejnego odkrycia: natrafili na nowy rodzaj cząstki ze śladem w kształcie V. Blackett po raz pierwszy znalazł ślad w kształcie V, powstający gdy cząstka obojętna elektrycznie (foton) rozpadała się na dwie cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym (elektron i pozyton). Nowa cząstka dająca ślad V znowu musiała być obojętna elektrycznie, ale tym razem rozpadała się na dodatnio i ujemnie naładowane piony. Ostatecznie nazwano ją kaon (oznaczenie symboliczne K). Musiała być ciężka, skoro rozpadała się na piony. Niestabilne ciężkie cząstki powinny szybko ulegać rozpadowi, tymczasem kaon, jakimś dziwnym sposobem, trwał bardzo długo. Grupa z Caltechu potwierdziła odkrycie i dodała jeszcze jeden rodzaj kaonu, tym razem obdarzony ładunkiem elektrycznym. Sprawy zaczynały się komplikować: czym były te wszystkie cząstki i jak wiele ich jeszcze zostało do odkrycia? Udzielenie odpowiedzi na te pytania wymagało inwencji i wprowadzenia nowych technologii.

Nauka akceleratorowa

Po drugiej wojnie światowej potencjalne niemilitarne zastosowania energii atomowej spowodowały, że wzrosło zainteresowanie fizyką i przeznaczano na badania znaczne środki finansowe. W latach pięćdziesiątych XX wieku zaczęły działać wielkie laboratoria badawcze, w tym Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Rosji, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) w Europie i kilka nowych laboratoriów w Stanach Zjednoczonych, które do dzisiaj administrowane są przez Departament Energii. Badania w dziedzinie fizyki cząstek przestawały być domeną małych zespołów badawczych, działających na uniwersytetach i skupiających się na promieniowaniu kosmicznym, a stawały się specjalnością dużych zespołów zatrudnianych przez te laboratoria i posługujących się najnowszymi narzędziami badawczymi: akceleratorami cząstek.

Nieco dalej w tej książce objaśnię działanie akceleratora cząstek; zasadniczo jego zadaniem jest po prostu przyspieszać cząstki i zderzać je z sobą. Jest to sposób na odtworzenie tego, co się dzieje, gdy promieniowanie kosmiczne uderza w górne warstwy atmosfery, z tą różnicą, że teraz detektor można umieścić tuż obok miejsca, w którym dochodzi do zderzenia, wychwytując wszystkie zdarzenia.

Oprócz tych nowych akceleratorów cząstek, których zadaniem jest wytwarzanie zderzeń, pojawił się również nowy typ detektora cząstek, umożliwiający badanie wyników. W 1952 roku komora mgłowa została zastąpiona komorą pęcherzykową, wynalezioną przez kolejnego studenta Andersona, Donalda Glasera. Idea była podobna, ale jonizacja, za sprawą której w komorze mgłowej dochodziło do kondensacji pary wodnej w powietrzu, teraz wywoływała wytwarzanie pęcherzyków w nasyconej gazem cieczy (w jednym z prototypów użyto piwa). Zaletą takiego rozwiązania jest większa gęstość cieczy w porównaniu z powietrzem: cząstki o dużej prędkości mogą przejść przez komorę mgłową bez zostawienia śladu, ale prawdopodobieństwo zjonizowania przez taką cząstkę gęściej upakowanych atomów cieczy wypełniającej komorę pęcherzykową

jest znacznie większe. Ten nowy wynalazek po raz pierwszy umożliwił eksperymentalne badanie wysokoenergetycznych cząstek.

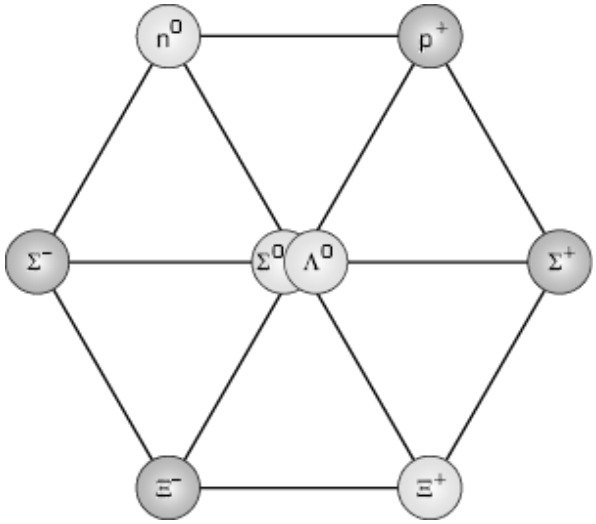
Ponieważ teraz można było zderzać cząstki niemal na zawołanie, liczba pozyskiwanych danych gwałtownie wzrosła. Nowe urządzenia przybrały ogromne rozmiary – na przykład komora pęcherzykowa Gargamelle w CERN, w kształcie cylindra, miała 2 metry średnicy i 4,8 metra długości, o czym można się przekonać, oglądając ją tam na wystawie dla zwiedzających. Kiedy jeszcze działała, w latach siedemdziesiątych XX wieku, dostarczyła ponad milion zdjęć śladów cząstek i opracowanie takiej liczby wyników stanowiło nie lada wyzwanie. Porcje danych wysyłano z laboratorium do współpracujących uniwersytetów, z których wiele zatrudniło dodatkowe osoby do opracowywania wyników. Na moim macierzystym uniwersytecie, UCL, był taki moment, gdy zespół analityków obrazu liczył trzydzieści osób, głównie młodych studentów, czasem pracujących nocami, aby szybko przekopać się przez najświeższe wyniki – studenci zawsze dostają najciekawsze prace. We współczesnych eksperymentach dane pozyskiwane są w postaci cyfrowych odczytów czujników, a nie zdjęć, toteż większa część pracy związanej z przesiewaniem i sortowaniem wyników wykonywana jest przez komputery. Tylko one mogą sobie poradzić ze złożonością sygnałów i przytłaczającą liczbą wywoływanych zderzeń. Aby dokonać odkrycia bozonu Higgsa, trzeba było przeanalizować ponad sześć tysięcy milionów milionów zderzeń. Jeżeli analizowalibyśmy dane w tempie jednego zapisu na sekundę, na wykonanie całego zadania potrzebowalibyśmy blisko 200 milionów lat.

Ścieżka ośmiokrotna

Wprowadzenie w latach pięćdziesiątych XX wieku nowych akceleratorów cząstek i bardziej czułych detektorów szybko przyniosło efekty w postaci odkrycia całej gromady nowych cząstek. W pewnej chwili można było odnieść wrażenie, że świat subatomowy

jest pod kontrolą, całą materię tworzyły elektron, proton i neutron. Potem pojawiło się pięć, dziesięć, dwadzieścia nowych cząstek i nie chodziło już o wyjaśnienie istnienia mionu, pionu i kaonu, trzeba było wyjaśnić istnienie całego zoo: eta (η), ro (ρ), sigma (Σ), ksi (Ξ), omega (Ω)... coraz poważniej należało traktować obawy, że do oznaczania cząstek zabraknie liter greckiego alfabetu. Trzeba było coś zrobić.

Wraz z nastaniem 1960 roku teoretycy musieli spróbować nadać temu wszystkiemu jakiś sens. Dwaj badacze, niezależnie od siebie, wpadli na pomysł, jak za pomocą właściwości cząstek uporządkować to zoo: byli to Juwal Ne'eman i Murray Gell-Mann. Ponieważ ta „tablica okresowa cząstek" zawierała osiem elementów, Gell-Mann nazwał ją ścieżką ośmiokrotną, nawiązując do buddyjskiej ścieżki ośmioaspektowej.



Jedna z tablic cząstek Gell-Manna

Przebijające się z tych tablic schematy wskazywały na istnienie jakiejś zasady leżącej u podstaw uporządkowania i w 1964 roku Gell-Mann zrozumiał, o co tu chodzi. Wszystko można było wyjaśnić za pomocą zaledwie trzech podstawowych elementów budulcowych, które łączyło się w różnorodny sposób, aby otrzymać różne cząstki odkrywane w wyniku przeprowadzanych eksperymentów. Jeden

ze studentów Feynmana, George Zweig, niezależnie wpadł na ten sam pomysł, co jest kolejnym przykładem jednoczesnego odkrycia. Zweig nazwał te mniejsze cząstki „asami", jednak to propozycja Gell-Manna się przyjęła: „kwark".

Słowo na temat wymowy. Początkowo, gdy wpadł na pomysł nazwy „kwark", Gell-Mann wyobrażał sobie coś przypominającego odgłos wydawany przez kaczkę. Później znalazł w książce *Finneganów tren* Jamesa Joyce'a cytat: „Niech kwarki trzy ma Mark!"[1]. Od tej pory większość ludzi kojarzy wyraz kwark z Markiem, a nie z kwaknięciem. Obecnie, na dobre i na złe, wprowadzane nazwy nie odnoszą się do literatury, ale są na ogół akronimami, czasem zwyczajnymi i bez polotu (jak LHC, który z czasem może zastąpić VLHC, gdy dodamy pierwszą literę od angielskiego wyrazu „bardzo"), a czasem brzmiącymi wręcz zabawnie (mamy ATLAS = A Toroidal LHC Apparatus, jak też WIMP = Weakly Interacting Massive Particle). Wynajdywanie akronimów wątpliwej jakości stało się ulubioną rozrywką naukowców zajmujących się fizyką cząstek.

Dwa kwarki Gell-Manna nazywają się „górny" i „dolny". Tworzą one proton i neutron, jak też pion i kilka innych cząstek z zoo. Proton składa się z trzech kwarków: górnego, górnego i dolnego. Neutron zaś z dolnego, dolnego i górnego. Żeby uzyskać właściwy ładunek elektryczny, kwarki muszą przenosić jego ułamek: +2/3 w wypadku kwarka górnego i –1/3 w wypadku kwarka dolnego, dzięki czemu ładunek neutronu jest zerowy, a protonu wynosi +1, co w atomie stanowi przeciwwagę dla ładunku –1 elektronu. Kwarki mają swoje odpowiedniki z antymaterii i tak jak antyelektron, cechują je ładunki elektryczne przeciwne do ładunku odpowiadającej im cząstki ze zwykłej materii. Pion składa się z jednego kwarka i antykwarka: górnego i antygórnego, albo dolnego i antydolnego w wypadku pionów obdarzonych ładunkiem elektrycznym. Cząstki złożone z trzech kwarków są znacznie cięższe od tych zbudowanych z dwóch kwarków, toteż zostały nazwane „barionami", od greckiego słowa oznaczającego „ciężki". Cząstki złożone z dwóch kwarków nazwano „mezonami", od greckiego słowa oznaczającego „pośredni" – są one lżejsze od barionów, ale cięższe od elektronu. Wszystkie cząstki

składające się z kwarków, bariony i mezony łącznie nazywa się hadronami (od greckiego słowa oznaczającego „gruby” lub „masywny”). Właśnie to słowo występuje w nazwie Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC).

Aby wyjaśnić istnienie kaonów i innych dziwnie długowiecznych cząstek, konieczne było wprowadzenie trzeciego kwarka: zyskał on miano „dziwnego”. Jest on cięższy niż kwark górny lub dolny, przez co kaon (dodatni kaon zbudowany z kwarków górnego i antydziwnego) jest cięższy od pionu (dodatni pion zbudowany jest z kwarków górnego i antydolnego). Tak oto zostało przywrócone jakieś poczucie porządku: do objaśnienia atomu i wszystkich cząstek z zoo potrzeba było tylko elektronu i trzech kwarków. Wszystkich z wyjątkiem mionu. Nikt nie wiedział, co z nim począć.

Budowanie Modelu Standardowego

Pojawiło się wiele udoskonalonych projektów i nowych technologii, które sprawiły, że akceleratory cząstek stawały się coraz potężniejsze, zdolne wywoływać zderzenia, w których wydziela się coraz więcej energii. Ewoluowały również detektory rejestrujące te zderzenia, komory pęcherzykowe zostały zastąpione urządzeniami, których czas reakcji na zderzenie był krótszy i które dostarczały danych w postaci łatwiej poddającej się analizie niż zdjęcia: komory iskrowe, komory wielodrutowe proporcjonalne, komory dryfowe, komory projekcji czasowej, detektory Czerenkowa (RICH), kalorymetry próbkujące, detektory krzemowe i wiele więcej.

Pod koniec lat sześćdziesiątych XX wieku akceleratory cząstek były dostatecznie potężne, aby zderzać z sobą protony, dodając powagi twierdzeniu, że składają się one z mniejszych cząstek, kwarków. Wciąż istniało wiele wątpliwości: nikt nigdy nie zarejestrował kwarka w sposób bezpośredni. Wątpliwości jeszcze się nasiliły, gdy – o czym przekonamy się w rozdziale 5 – nowa teoria, znana jako Model Standardowy, sugerowała, iż kwarki powinny zawsze występować parami. Kwark górny tworzy parę z kwarkiem dolnym, musiał więc

istnieć jeszcze jeden nowy kwark, „powabny”, który stanowiłby parę z kwarkiem dziwnym, ale nigdzie nie było najmniejszego śladu potwierdzającego słuszność tego domysłu.

Do czasu. W 1974 roku zespoły badawcze działające w laboratoriach w Brookhaven i Stanfordzie w Stanach Zjednoczonych jednocześnie odkryły nową cząstkę, cięższą od wszystkiego, co do tej pory znano, odpowiadającą mezonowi złożonemu z kwarków powabnego i antypowabnego. Zespół z Brookhaven nazwał nową cząstkę J, ten ze Stanfordu wybrał Ψ. Dziś używamy niezręcznej kombinacji J/Ψ. Zespół ze Stanfordu odkrył jeszcze cięższą odmianę tej samej cząstki i w jej nazwie pominięto J, zostawiając tylko Ψ – czyli „psi prime”. Odkrycie kwarka powabnego było pierwszym aktem „rewolucji listopadowej” w fizyce cząstek, która rozwiała jakiekolwiek wątpliwości na temat istnienia kwarków i potwierdziła słuszność teorii Modelu Standardowego.

Wraz z nastaniem roku 1977 akceleratory stały się jeszcze potężniejsze, a liderem badań w zakresie wysokich energii zostało znajdujące się w Stanach Zjednoczonych Narodowe Laboratorium Przyspieszania Cząstek Elementarnych im. Enrica Fermiego (Fermilab). Odkryto nową grupę cząstek, hadronów zawierających jeszcze cięższy kwark, „niski”. Ten również musi mieć partnera, kwarka „wysokiego” (alternatywne nazwy, „piękny” i „prawdziwy”, na szczęście się nie przyjęły). Kwark wysoki wymykał się obserwacji aż do 1995 roku, gdy powstał dostatecznie silny sprzęt: Tevatron, ulokowany również w Fermilabie. Tevatron pozostawał najpotężniejszym narzędziem badawczym w zakresie najwyższych energii na świecie aż do 2009 roku, gdy został zdetronizowany przez LHC. LHC jest niemal siedem razy potężniejszy od Tevatronu i blisko tysiąc razy potężniejszy od akceleratorów z lat sześćdziesiątych.

Co jednak z mionem? Dzisiaj wiemy, że w zasadzie jest to ciężki elektron – około 200 razy cięższy. Jest jedną z tych cząstek, które najłatwiej zaobserwować nawet przy użyciu zwykłej komory mgłowej, gdy do demonstracji wykorzystuje się suchy lód. Jest też dobrze zrozumianym członkiem rodziny Modelu Standardowego. W 1975 roku odkryto jeszcze cięższą kopię elektronu – taon. Kwarki zawsze występują w parach, a elektron, mion i taon również mają

partnera, którym jest neutrino. Neutrina są na tyle interesujące, że należy im się osobny rozdział w tej książce. Na razie jednak te sześć cząstek wypełnia listę „leptonów” (z greckiego: „małych”). Nazwę przydzielono im, zanim została odkryta ciężka cząstka taon. Tym samym mamy już pełny obraz: 6 kwarków i 6 leptonów to 12 fermionów, cząstek Modelu Standardowego tworzących materię. Ogólny schemat ilustrujący ten pogmatwany zestaw cząstek znajduje się na początku książki.

Wielka nauka

Fizyka cząstek została zapoczątkowana przez kilka indywidualności, pracujących na uniwersytetach rozsianych po całym świecie: wybrałem Cambridge i Caltech jako przykład ośrodków badawczych, ale jest ich więcej. Po drugiej wojnie światowej nastąpiła zmiana i zaczęto preferować większe, potężniejsze eksperymenty, dla których bazą były narodowe lub międzynarodowe laboratoria. Z całą pewnością wciąż kluczowy jest wkład wnoszony przez indywidualności, jednak od jakiegoś czasu fizyka cząstek w swej najbardziej zaawansowanej postaci stała się sportem drużynowym – dzięki czemu postęp jest znacznie szybszy.

Dziś większość badaczy, podobnie jak ja, jest związana z uniwersytetami rozsianymi po całym świecie, ale prace doświadczalne prowadzone są w laboratoriach. Publikacje naukowe opisujące największe eksperymenty w LHC, ATLAS i CMS mają po 3000 autorów – oznacza to, że ponad 3000 osób miało istotny wkład w konstruowanie, funkcjonowanie, utrzymanie infrastruktury i przetwarzanie danych pozyskanych w tych eksperymentach. Zespół, który faktycznie dokonuje analizy na potrzeby konkretnej pracy, jest zwykle znacznie mniejszy, może liczyć od trzech do pięćdziesięciu osób – jednakże żadna analiza nie mogłaby zostać przeprowadzona, gdyby nie wkład wszystkich. Nie da się ukryć, iż jest to długa lista nazwisk. Jednej z prac opisujących pewne wyniki połączonych eksperymentów ATLAS i CMS przypadł wątpliwy zaszczyt pobicia

światowego rekordu w dziedzinie długości listy autorów – zawiera ona ponad 5000 nazwisk.

Historia, którą tu opowiadam, koncentruje się na zakresie najwyższych osiąganych energii, najpotężniejszych akceleratorach cząstek, za pomocą których dokonywane są największe odkrycia. Jest jednak jeszcze druga strona tej historii, reprezentowana przez szerokie spektrum eksperymentów na mniejszą skalę, ukierunkowanych na pomiar właściwości cząstek po ich odkryciu. Eksperymenty te powiedziały nam o mechanizmach działania subatomowego świata tyle samo, jeśli nie więcej. Część z nich zostanie opisana na kartach tej książki.

Obraz, który wyłonił się w XX wieku i został nazwany Modelem Standardowym, jest strzałem w dziesiątkę. Opisuje Wszechświat w zakresie najwyższych energii i najmniejszej skali, w jakiej kiedykolwiek byliśmy w stanie dokonywać pomiarów. Badania nad cząstkami tu, na Ziemi, dostarczają nam wiedzy na temat zachowania tych samych cząstek w całym dzisiejszym Wszechświecie, ale również podpowiadają, co wydarzyło się wcześniej niż po upływie jednej miliardowej sekundy po Wielkim Wybuchu. W zasadzie Model Standardowy jest tak udany, że aż kusi, aby dokonać porównania z fizyką klasyczną – model działa, ale wciąż zostaje do uzupełnienia kilka szczegółów i kolejne wielkie odkrycie, dokonane w wyniku prac eksperymentalnych, może spowodować, że jeszcze raz cała misterna konstrukcja się zawali.

Jak większość ludzi zaczynających karierę w dziedzinie fizyki, miałem przed sobą wybór między zagłębieniem się w prace eksperymentalne i teoretyczne. Badania teoretyczne to wielkie idee, piękna matematyka i potęga objaśniania, podczas gdy prace doświadczalne potrafią być kłopotliwe i frustrujące. Chciałem jednak zmierzyć się z tymi kłopotami, chciałem mieć swój udział w następnym wielkim odkryciu – czy będzie to niespodzianka w rodzaju mionu, czy przełom technologiczny na miarę komory mgłowej, otwierający przed nami zupełnie nowy obszar badań. Obecnie szukaniem sposobu na uzupełnienie luk zajmuje się LHC, ale nie jest to jedyna impreza w mieście. Później omówię kilka z wielu mniejszych eksperymentów, w których Model Standardowy

testowany jest na inne sposoby. Wszystkie prowadzone są z nadzieją osiągnięcia nowego przełomu, punktu, w którym Model Standardowy się załamuje.

Najpierw jednak dowiedzmy się więcej o Modelu Standardowym w jego obecnej postaci. Świat to coś więcej niż zbiór fermionów, budzi się on do życia za sprawą fundamentalnych oddziaływań. Do tej pory mówiłem jedynie o elektromagnetyzmie, ale bozonem, który przenosi to oddziaływanie, jest foton. Żyjemy w świecie zdominowanym przez elektromagnetyzm: elektryczność zasilająca wszystkie nowoczesne urządzenia pochodzi od tej samej siły, która utrzymuje elektrony na orbicie wokół jądra atomowego. Elektrony różnych atomów oddziałują z sobą elektromagnetycznie, kształtując otaczający nas świat: to dzięki nim możemy się cieszyć wielością różnorodnych substancji, różnych barw, złożonych cząsteczek mających udział w tworzeniu życia. Oczywiście, grawitacja utrzymuje nas na powierzchni Ziemi, ale to dzięki elektromagnetyzmowi warto tu być. Niemniej jednak elektromagnetyzm jest tylko jedną z trzech sił Modelu Standardowego. Dwie pozostałe zachowują się zupełnie inaczej, ale nie zmienia to faktu, że są absolutnie niezbędne dla struktury Wszechświata, o czym się zaraz przekonamy.

1 W przekładzie Krzysztofa Bartnickiego (przyp. red.).

ROZDZIAŁ 4

NIEWYKRYWALNY KWARK

Przez pewien, krótki czas w latach dwudziestych ubiegłego wieku wydawało się, że świat subatomowy może być całkiem prosty. Wszystko zrobione jest z atomów, a atom to nic innego, jak jądro i krążące wokół niego elektrony, utrzymywane na miejscu przez oddziaływania elektromagnetyczne. To wystarcza, żeby wyjaśnić układ okresowy pierwiastków oraz mechanizm łączenia się atomów w molekuły oraz, teoretycznie, w bardzo złożone struktury, takie jak DNA czy mózg człowieka. Oczywiście, znajomość dwunastu nut gamy nie oznacza, że możemy zagrać każdy fragment muzyczny na świecie, podobnie wiedza o tym, jak działają atomy, nie oznacza, że rozumiemy wszystko, co może być z nich zbudowane, ale z całą pewnością wszystko musi być podporządkowane tym samym podstawowym regułom, regułom mechaniki kwantowej.

Jednak, jak się przekonaliśmy, okazało się, że podstawowe cegiełki Wszechświata wcale nie są tak proste, jakby się zdawało. Odkrycie w zoo cząstek elementarnych mionów i hadronów oznaczało, że reguły muszą zostać zweryfikowane. Do Modelu Standardowego trzeba było dodać dwa kolejne oddziaływania: silne i słabe. W pewnym sensie są one podobne do oddziaływania elektromagnetycznego, z którym spotkaliśmy się w rozdziale 2: ich nośnikami są bozony, które wędrują między cząstkami przenoszącymi ładunek. W przeciwieństwie do oddziaływania elektromagnetycznego żadnego z nich, ani oddziaływania silnego, ani słabego, nie możemy doświadczyć bezpośrednio. Ten rozdział i następny opowiadają o obu oddziaływaniach, objaśniają, dlaczego

są one przed nami ukryte oraz dlaczego świat, jaki znamy, nie mógłby bez nich istnieć.

Silne kolory

Jądro atomu przez dłuższy czas było dla nas zagadką. Przede wszystkim jest ono maleńkie – gdyby atom miał rozmiary stadionu sportowego, jego jądro byłoby wielkości leżącego w centrum stadionu ziarnka groszku. Odkryto to dopiero w 1911 roku, kiedy Geiger i Marsden, bombardując folię ze złota wysokoenergetycznymi cząstkami promieniowania alfa, zaobserwowali, że niektóre z nich odbijają się z powrotem. Do końca lat trzydziestych XX wieku odkryto składniki jądra, protony i neutrony, lecz co trzyma je razem? Protony przenoszą ładunki dodatnie i jak wszystkie cząstki obdarzone tym samym ładunkiem powinny się odpychać, prowadząc do rozpadu jądra. Neutrony nie mają ładunku elektrycznego, nie mogą więc znieść tego odpychania, ale muszą odgrywać jakąś rolę. Jeżeli jądro ma być stabilne, wymagana jest subtelna równowaga między liczbą protonów i neutronów – zbyt dużo lub zbyt mało i atom stanie się radioaktywny. Uświadomienie sobie, że protony, neutrony i wszystkie inne hadrony w zoo cząstek elementarnych są zbudowane z kwarków, zrodziło kolejne pytanie: co trzyma kwarki razem, żeby tworzyły hadrony, w pierwszym rzędzie takie jak protony i neutrony?

Było czymś oczywistym, że w grę musi wchodzić jakieś inne oddziaływanie, znacznie potężniejsze od elektromagnetycznego. Nazwano je oddziaływaniem silnym czy też siłami jądrowymi. Stosownie do nazwy, oddziaływanie silne jest najsilniejszym, jakie znamy – jednak przez długi czas właściwie nie było wiadomo, jaki jest mechanizm jego działania. Powstawały i upadały kolejne, konkurujące z sobą idee – jedną z nich była opracowana w latach trzydziestych XX wieku teoria Yukawy, która przewidywała istnienie pionu. Pod koniec lat sześćdziesiątych, kiedy zbudowano wreszcie akceleratory cząstek wystarczająco potężne, by roztrzaskiwać protony, możliwe stało się badanie oddziaływania silnego w akcji

i zaczął wyłaniać się pewien konsensus. Teoria zwana chromodynamiką kwantową (QCD), oparta na elektrodynamice kwantowej (QED), odnoszącej sukcesy teorii oddziaływania elektromagnetycznego, pozwoliła opisać wszystkie dane eksperymentalne i to ona właśnie jest teorią oddziaływania silnego, którą posługujemy się dzisiaj.

Między elektrodynamiką kwantową a chromodynamiką kwantową zachodzi wiele podobieństw, toteż chcąc zrozumieć, dlaczego w praktyce ich zachowanie tak bardzo się różni, trzeba przyjrzeć się bliżej pewnym szczegółom. W elektrodynamice kwantowej oddziaływanie elektromagnetyczne przenoszone jest przez „nośniki oddziaływań", jakimi są fotony, zaliczane do bozonów. Każda cząstka przenosząca ładunek elektryczny może emitować lub absorbować fotony, które to oddziaływania da się narysować za pomocą prezentowanych w rozdziale 2 prostych diagramów Feynmana. Bombardując się nawzajem fotonami, cząstki o tym samym ładunku elektrycznym odpychają się, a te o przeciwnym ładunku elektrycznym przyciągają – zgodnie z analogią użytą w rozdziale 2, wystrzeliwane fotony mogą działać jak „kule" lub „bumerangi". Wysokoenergetyczne fotony mogą również zamienić się w cząstkę i antycząstkę, taką jak elektron i pozyton, które przenoszą ładunki przeciwnych znaków.

Teraz rozszerzmy to na chromodynamikę kwantową. Ona również ma cząstkę przenoszącą oddziaływanie, stowarzyszony z nim bozon zwany gluonem (z ang. *glue* – klej; gluon skleja z sobą kwarki, by stworzyć hadrony). Gluony mogą oddziaływać z dowolną cząstką, która przenosi „ładunek oddziaływania silnego" określany jako kolor (stąd „chromo" w nazwie chromodynamiki kwantowej), aczkolwiek to tylko nazwa i z prawdziwymi kolorami nie ma więcej wspólnego niż barwny język, jaki można usłyszeć podczas szczególnie gorących dyskusji w LHC. Te oddziaływania również można przedstawić za pomocą diagramów Feynmana. Kwarki, jak wszystkie fermiony, są na nich zaznaczane za pomocą linii prostych, a gluony za pomocą linii falistych. Na tym jednak podobieństwa z QED się kończą.

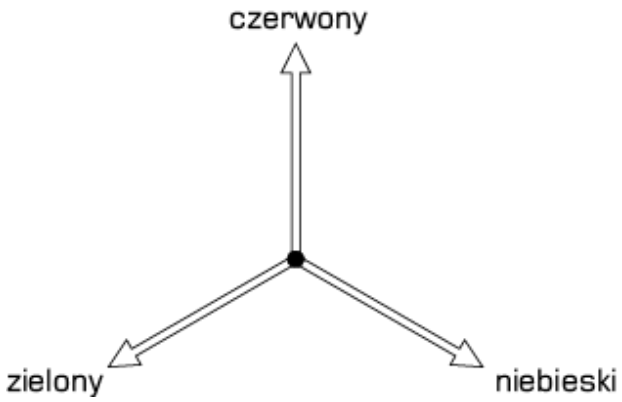
Fotony mają całkiem duży zasięg. Cząstki mogą wymieniać fotony i odpychać się lub przyciągać na ogromnych dystansach, jak igła

magnetyczna, poruszana jądrem magnetycznym znajdującym się w centrum Ziemi. Inne fotony, takie jak światło odległych galaktyk, mogą do nas dotrzeć, pokonując miliardy kilometrów. Lecz ani gluony, ani kwarki nie zapuszczają się poza wygodne wnętrze hadronu – coś koło milionowej miliardowej części metra. Ponieważ są tak uwiązane, nigdy nie dokonaliśmy bezpośredniej obserwacji kwarka ani gluonu, a zanim udało nam się roztrzaskać hadron, nie widzieliśmy ich również w działaniu. Tyle że raczej nie robimy tego na co dzień – o ile nie pracujemy w LHC.

Przyczyną różnic między fotonami a gluonami jest natura „ładunku kolorowego". Ładunek elektryczny jest wielkością stosunkowo prostą: jest „jednowymiarowy", podobnie jak oś liczbowa. Może on być dodatni lub ujemny; jeśli zgromadzimy razem dwie cząstki o ładunku dodatnim, otrzymamy dwie jednostki ładunku, trzy cząstki dodatnie dadzą trzy jednostki ładunku. Weźmy cząstkę dodatnią i ujemną, a otrzymamy zerowy ładunek elektryczny. A ponieważ ładunki przeciwnych znaków przyciągają się, dodatnie i ujemne cząstki mają skłonność do łączenia się w grupy i tworzenia takich obiektów jak atomy, których ładunek całkowity jest równy zeru. Natura lubuje się w tego rodzaju symetriach.

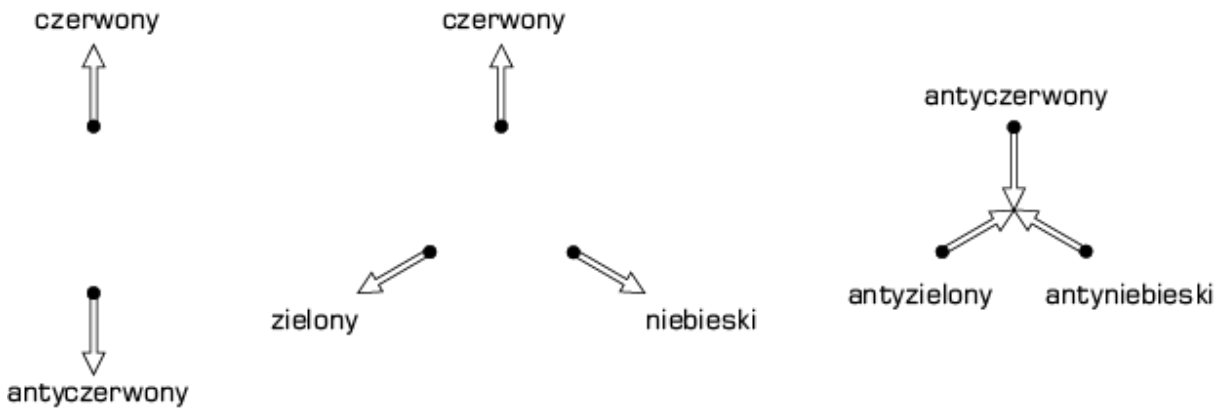
Ładunek kolorowy jest inny. Jest „trójwymiarowy". To znaczy, że oprócz tego, iż podobnie jak ładunek elektryczny może mieć znak dodatni lub ujemny, może też mieć dany kierunek, który dla wygody określono jako „czerwony", „zielony" lub „niebieski" – pojęcia „górny" i „dolny" zostały już wykorzystane do opisu samych kwarków. O ile cząstka przenosząca jedną jednostkę ładunku elektrycznego niczym nie różni się od innych, o tyle cząstka przenosząca jednostkę ładunku kolorowego zachowuje się jak wiatrowskaz, który może być skierowany w trzy różne strony: w kierunku czerwonym, niebieskim lub zielonym. W zależności od tego, w którym kierunku ustawi się jego ładunek kolorowy, kwark górny może być czerwony, zielony lub niebieski – aczkolwiek to tylko analogia, w rzeczywistości kwarki nie mają żadnych maleńkich wskazówek. Antykwarki, antymaterialni partnerzy kwarków, przenoszą ładunki przeciwne: na przykład kwark górny przenosi +2/3 jednostki ładunku elektrycznego i 1 jednostkę ładunku kolorowego: czerwonego, niebieskiego lub zielonego.

Antymaterialny partner tego kwarka przenosi ładunek elektryczny o wartości –2/3 jednostki i ładunek kolorowy o wartości –1 jednostki: „antyczerwonego”, „antyniebieskiego” lub „antyzielonego”.



Ilustracja „wiatrowskazu” ładunku kolorowego w kwarku

Tak jak cząstki naładowane elektrycznie tworzą w atomach skupiska o całkowitym ładunku zerowym, kwarki zawsze skupiają się w kombinacjach, których całkowity ładunek kolorowy jest równy zeru. Bezbarwna może być para kwark i antykwark. Na przykład czerwony i antyczerwony dają całkowity ładunek kolorowy równy zeru. Stan kwark-antykwark odpowiada mezonom, z którymi spotkaliśmy się w poprzednim rozdziale: pionom, kaonom i tym podobnym cząstkom. Można również zgromadzić trzy kwarki, po jednym z każdego koloru, w pełni wykorzystując analogię do prawdziwych kolorów, zgodnie z którą czerwony + zielony + niebieski = biały czy też bezbarwny. Cząstki zawierające trzy kwarki to bariony, w tym protony i neutrony. To samo dotyczy trzech antykwarków, które mogą tworzyć takie cząstki, jak antyprotony i antyneutrony.



Uporządkowanie ładunku kolorowego wewnątrz hadronów (mezon, barion i antybarion)

To najprostsze metody takiego sklejania z sobą kwarków, żeby powstały obiekty pozbawione koloru, lecz jest ich naprawdę nieskończenie wiele, a w akceleratorach cząstek odkryto wiele hadronów egzotycznych. W kilku eksperymentach zaobserwowano tetrakwarki, cząstki zawierające dwa kwarki i dwa antykwarki (np. czerwony, niebieski, antyczerwony i antyniebieski). W 2015 roku detektor LHCb w CERN odkrył pentakwarki zawierające cztery kwarki i jeden antykwark (np. czerwony, zielony, niebieski, czerwony i antyczerwony). Problem z tetra- i pentakwarkami (i w istocie z wieloma innymi egzotycznymi kombinacjami) polega na tym, że zawsze mogą ulec rozszczepieniu na dwie lżejsze kombinacje, które również są bezbarwne. Na przykład tetrakwark może się rozpaść na mezon czerwono-antyczerwony i mezon niebiesko-antyniebieski. Pentakwark może się rozpaść na barion czerwono-zielono-niebieski i mezon czerwono-antyczerwony. I najwyraźniej tak właśnie się dzieje, i to bardzo szybko: pentakwarki odkryte w LHCb żyją około 10^{-23} sekundy, czyli kilka milionowych miliardowych miliardowych części sekundy. Każda kombinacja inna niż kwark-antykwark, trzy kwarki lub trzy antykwarki jest wysoce niestabilna.

Zmienianie kolorów

Ten trójwymiarowy ładunek kolorowy stanowi centralny punkt teorii chromodynamiki kwantowej (QCD). Kwarki nie tylko mogą sklejać się z sobą, tworząc obiekty pozbawione koloru, ale mogą również zmieniać swój kolor. I to właśnie robią gluony: jeżeli ładunki kolorowe kwarka są wycelowanymi w jednym z trzech możliwych kierunków wiatrowskazami, to gluony są niczym obracający je wiatr – nie zmieniają całkowitej zawartości ładunku kolorowego ani rozmiarów wiatrowskazu, ale jedynie kierunek, w którym jest on ustawiony.

Jest to możliwe wyłącznie dzięki kluczowej różnicy między fotonami a gluonami: podczas gdy fotony nie przenoszą ładunku elektrycznego, gluony przenoszą ładunek kolorowy. Właściwie dwa rodzaje ładunku, kolorowy i antykolorowy. Całość może wydawać się dość skomplikowana, ale oto konkretny przykład. Czerwony kwark może wyemitować gluon czerwony + antyniebieski i zamienić się w kwark niebieski – całkowita ilość każdego koloru zawsze pozostaje ta sama: czerwony zmienia się w czerwony + niebieski + antyniebieski, który ponownie sumuje się w czerwony, choć teraz kolor jest rozdzielony pomiędzy kwarkiem a gluonem. Ten czerwono-antyniebieski gluon może zostać wchłonięty przez antyczerwony antykwark, który zamieni się tym samym w kwark antyniebieski. Całkowita ilość każdego ładunku kolorowego wciąż pozostaje ta sama. Tak więc mezon zbudowany z kwarka i antykwarka nieustannie zmienia kolor. Może zacząć jako czerwony i antyczerwony, lecz po wymianie gluonów zamienić się w niebieski i antyniebieski, potem w zielony i antyzielony, ponownie w czerwony i antyczerwony i tak dalej.

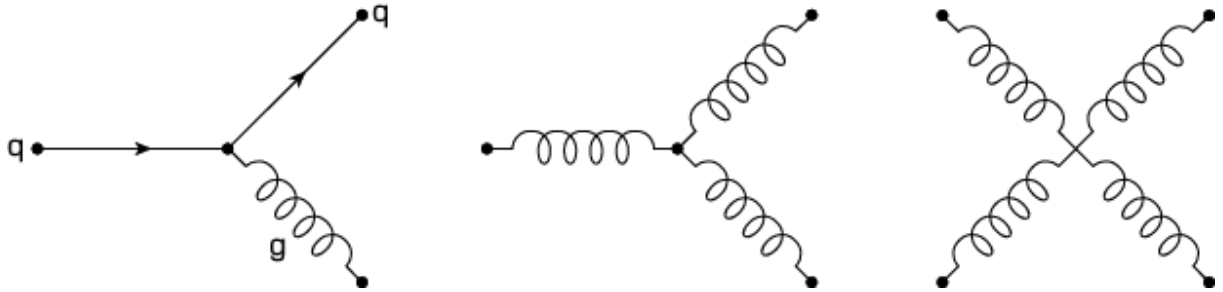
Ale nie musicie tego wszystkiego pamiętać! Najważniejsze, że niezależnie od tego, jaki kolor mają indywidualne kwarki, całość zawsze się równoważy i koniec końców ładunek kolorowy hadronu za każdym razem jest równy zeru. Prawdę mówiąc, ta nieustanna zmiana koloru kwarków jest dla nas kompletnie niewidoczna, ponieważ nie możemy poddawać ich bezpośrednim pomiarom. Hadron jest niczym sunący łagodnie po gładkiej tafli jeziora łabędź. Tu trwa nieustanna, niewidoczna dla naszych oczu zmiana kolorów, tam ukryty pod powierzchnią wody zapamiętały ruch wiosłujących

łap. I tak bez przerwy, w centrum każdego atomu wewnątrz każdego z nas. Świat, kiedy lepiej mu się przyjrzeć, jest naprawdę dziwnym miejscem.

Latające kolory

Mając w pamięci obraz kwarków jako maleńkich wiatrowskazów obracanych w różnych kierunkach przez gluony, warto ponownie przyjrzeć się porównaniu z elektrodynamiką kwantową i fotonem. Głębsza analiza ujawnia nam powody, dla których zachowanie oddziaływania silnego jest tak odmienne od oddziaływania elektromagnetycznego, w tym również powody, dla których oddziaływanie silne nadaje kształt otaczającemu nas światu.

Fotony oddziałują z cząstkami, które przenoszą ładunek elektryczny. Dowolna cząstka naładowana elektrycznie może zyskać energię, absorbując foton, stracić ją, emitując foton, lub oddziaływać z inną cząstką, wymieniając z nią foton. To samo dotyczy gluonów oraz cząstek mających ładunek kolorowy, i to mimo że ładunek kolorowy wydaje się bardziej skomplikowany niż elektryczny. Pojawia się jednak istotna różnica: same fotony nie przenoszą ładunku elektrycznego, zatem nie oddziałują z innymi fotonami. Natomiast gluony przenoszą ładunek i dlatego właśnie oddziaływanie silne jest szczególne: gluony mogą oddziaływać z innymi gluonami. Te oddziaływania między gluonami wymagają nowych reguł, które można wykorzystać do budowania teorii, nowego typu diagramów Feynmana, na których widoczne będą wierzchołki uwzględniające dwa gluony, a nawet wierzchołek uwzględniający cztery gluony:



Komponenty QCD na diagramach Feynmana

Podobnie jak wierzchołki w QED, te nowe wierzchołki gluonowe mogą być obracane w dowolnym kierunku. Wynika z nich, że jeden gluon może być absorbowany przez inny. Albo że jeden gluon może rozszczepić się na dwa: gluony mogą się powielać i właśnie to cały czas dzieje się wewnątrz hadronów.

Uważamy za rzecz oczywistą, że nie dotyczy to fotonów, bo zwyczajnie wzajemnie się przenikają. Mam na swoim biurku lampkę ledową o mocy 5 W, która, choć nie jest specjalnie jasna, w każdej sekundzie emituje około miliarda miliardów fotonów. Niektóre z tych fotonów wędrują prosto do mojego oka. Inne oświetlają pokój, odbijając się od ścian, od biurka, klawiatury i tak dalej, rozpraszając się we wszystkich kierunkach. Choć trajektorie tych odbijających się wokół mnie fotonów nieustannie się przecinają, te ostatnie przechodzą przez siebie, nawet tego nie zauważając. Tym sposobem bezpośrednio do mojego oka docierają fotony z dowolnego kierunku, nawet jeśli muszą w tym celu przedrzeć się przez miliardy innych fotonów.

Gdybyśmy mogli zmienić elektrodynamikę kwantową, dodając regułę, że fotony przenoszą ładunek elektryczny i mogą oddziaływać z sobą nawzajem, świat byłby zupełnie inny. Wiemy, jak zachowują się naładowane cząstki, kiedy się spotkają: mogą wzajemnie się odpychać, odbijając się od siebie i zmieniając kierunek ruchu, lub wprost przeciwnie – przyciągać, sklejając się z sobą. To samo dotyczyłoby naładowanych elektrycznie fotonów. Teraz jeden mógłby nawet pochłonąć inny, zyskując energię. Wówczas opuszczający moją lampkę foton byłby w stanie pokonać zaledwie krótki dystans,

zanim napotkałby swojego pobratymca i albo zmienił kierunek ruchu w wyniku odpychania, albo go zaabsorbował. To samo mogłoby spotkać kolejny foton, i kolejny, i tak dalej. Wyobraźcie sobie, że w godzinach szczytu próbujecie przedrzeć się przez zatłoczony peron kolejki podmiejskiej, nieustannie odbijając się od innych ludzi i zmieniając kierunek ruchu dopóty, dopóki ktoś całkiem nie zablokuje wam drogi. Wyimaginowany foton z mojej lampki mógłby pokonać zaledwie niewielką odległość, zanim zacząłby się odbijać od innych fotonów, ewentualnie uległby pochłonięciu. Oddziaływania między fotonami oznaczałyby, że oddziaływanie elektromagnetyczne ma ograniczony zasięg: nie widziałbym już światła lampki biurkowej, a właściwie nie widziałbym niczego w moim pokoju, ponieważ żadne światło nie docierałoby do moich oczu.

I tak właśnie dzieje się w wypadku oddziaływania silnego. Nie doświadczamy go nigdy, ponieważ gluony przenoszą ładunek kolorowy i mogą przemieszczać się jedynie na bardzo małe odległości. Wszystko w hadronie jest z sobą mocno związane, a oddziaływanie silne zaledwie nieznacznie wycieka na zewnątrz, sklejając hadrony, gdy są tuż obok siebie, ciasno upakowane w jądrze atomu. Nic, co przenosi ładunek kolorowy, nie może uciec, dlatego w naturze można spotkać jedynie bezbarwne hadrony.

Ponieważ gluony przenoszą ładunek kolorowy, teoretycznie istnieje inny sposób na stworzenie bezbarwnej cząstki: kula gluonowa. Jak sama nazwa mówi, jest to maleńka kulka wielu związanych z sobą gluonów, nieustannie dzielących się, łączących i odbijających od siebie nawzajem, która tworzy cząstkę pozbawioną kwarków – sama siła, zero materii. Te dziwaczne twory byłyby równie niestabilne jak pentakwarki i jak dotąd brak jednoznacznych dowodów na ich istnienie. Mimo to stanowią kolejną możliwość wśród oferowanego przez Model Standardowy bogatego wyboru egzotycznej materii.

Ucieczka w dżecie

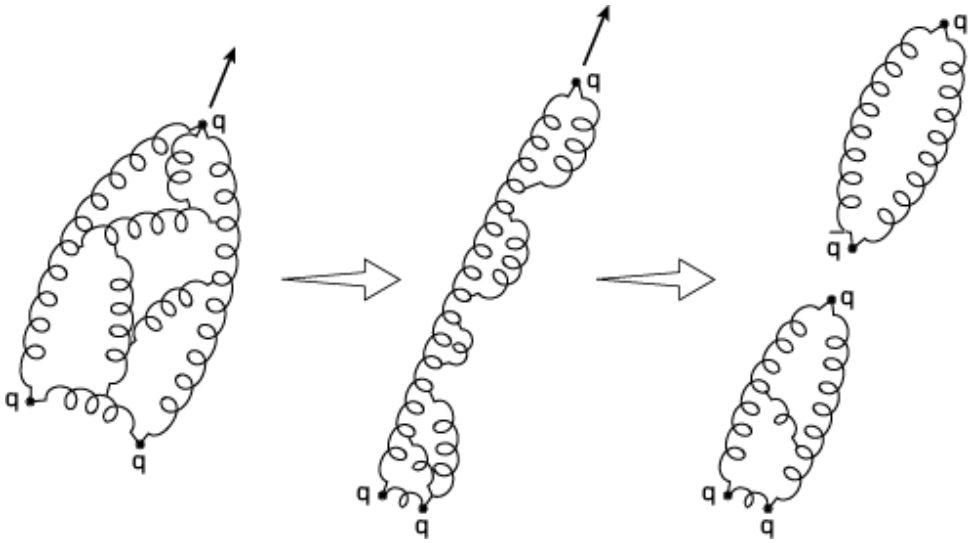
W Wielkim Zderzaczu Hadronów zderzamy protony w wysokich energiach – więcej niż wystarczających, by rozbić je w drobny mak. Zrozumienie oddziaływania silnego jest kluczem do zrozumienia niemal wszystkiego, co dzieje się w LHC, a w wyniku zderzeń udaje nam się zobaczyć, co się dzieje na tych bardzo małych odległościach, na których mogą działać gluony, i jak zachowuje się oddziaływanie silne, kiedy je sprowokować.

Zanim dojdzie do zderzenia, kwarki wewnątrz każdego protonu są z sobą związane wskutek wzajemnego ostrzeliwania się gluonami. Samo zderzenie to w gruncie rzeczy kolizja dwóch spośród tych kwarków lub nawet dwóch znajdujących się wewnątrz protonów gluonów. A ogromna energia zderzenia chwilowo unicestwia wpływ oddziaływania silnego. Uderzony kwark albo gluon zaczyna odlatywać, jakby był cząstką swobodną. Lecz kiedy próbuje uciekać, budzi się oddziaływanie silne.

Powiedzmy, że odlatującą cząstką jest kwark. Gluony, które wędrując tam i z powrotem, wiążą uciekający kwark z pozostałymi, mają teraz do przebycia coraz dłuższą drogę. A im dalej wędrują, tym większe prawdopodobieństwo, że wyemitują kolejny gluon. A potem kolejny, i jeszcze jeden, i tak dalej. Mimo że kwark wciąż się oddala, oddziaływanie silne nie poddaje się, pozostając na niezmienionym poziomie, przenoszone przez rozciągający się ku uciekinierowi łańcuch gluonów. Wyrzucenie kwarka z protonu jest niczym wykopanie piłki na szczyt wzgórza – w końcu wyczerpie mu się energia i ściągany przez gluony ponownie stoczy się w dół.

Oddziaływanie elektromagnetyczne zachowuje się inaczej. Jeżeli wezmę swoją lampkę i odsunę ją dalej wzdłuż ulicy, jej światło stanie się przyćmione – zdecydowanie zbyt słabe, żeby oświetlić moje biurko. Fotony rozchodzą się we wszystkich kierunkach i im dłużej wędrują od źródła w rodzaju mojej lampki, tym bardziej się rozpraszają. Skoro fotony ulegają rozproszeniu, oddziaływanie elektromagnetyczne również słabnie wraz z odległością (a właściwie z kwadratem odległości). Oddziaływanie silne jest całkiem inne i zasadniczo nie zmienia się z odległością, ponieważ im dłużej gluony podróżują, tym większą mają szansę na powielenie. Zwielokrotniając swoją liczbę, gluony mogą załatać każdą lukę, dzięki czemu nie

ulegają rozproszeniu. Tak więc kiedy kwark próbuje uciec, gluony cały czas ściągają go z powrotem. W końcu ktoś musi się poddać: albo kwark zostanie sprowadzony z powrotem do wnętrza protonu, albo, jeżeli zderzenie było wystarczająco twarde, struna gluonów pęknie – zajdzie „hadronizacja”:



Rozciąganie struny gluonów po rozpadzie protonu

Jeżeli w strunie gluonów zamknie się wystarczająca ilość energii, zaczną one tworzyć nowe cząstki – podobnie jak fotony, które w dostatecznie dużej energii mogą spontanicznie wyprodukować parę naładowanych elektrycznie cząstek materii i antymaterii. Jeden z łańcucha gluonów może spontanicznie zamienić się w kwark lub antykwark, co automatycznie spowoduje zerwanie połączenia między protonem a uciekającym kwarkiem. Nowy antykwark może związać się z uciekającym kwarkiem, tworząc mezon, podczas gdy nowy kwark może być przyciągnięty z powrotem do wnętrza protonu. Równie dobrze, jeżeli w pierwotnej kolizji było wystarczająco dużo energii, cały proces może się powtórzyć: kwarki mogą kontynuować swoją ucieczkę, kolejne struny gluonowe – pękać i będzie powstawać coraz więcej hadronów. W zderzeniach w LHC protony zostają zwykle kompletnie rozbite i możemy obserwować wylatujące z obszaru zderzenia setki nowych hadronów. Te nowe hadrony mają

tendencję do układania się wzdłuż kierunku ruchu pierwotnego kwarka (lub gluonu) i formują kolimowane wiązki zwane *dżetami*. To ważna koncepcja, do której wrócimy w następnych rozdziałach.

Pytanie za milion dolarów

Do tej pory opisywałem ogólnie zachowanie oddziaływania silnego, lecz tym, co w istocie nas interesuje, jest możliwość wykorzystania chromodynamiki kwantowej do obliczeń – na przykład tego, co może się wydarzyć podczas zderzenia w LHC. A tym, co sprawia, że obliczenia w QCD są naprawdę trudne, wcale nie są dodatkowe reguły rządzące oddziaływaniem między gluonami, ale fakt, że oddziaływanie silne jest tak silne. W języku diagramów Feynmana z rozdziału 2 oznacza to, że „stała sprzężenia", prawdopodobieństwo wytworzenia dodatkowych gluonów, jest bardzo duża. Stała sprzężenia dla QED, α, to około 1/137, lecz silna stała sprzężenia dla zderzeń w LHC (α_S) wynosi około 1/8. To znaczy, że bardziej skomplikowane diagramy Feynmana, z pętlami i dodatkowymi liniami, odgrywają znacznie większą rolę w QCD niż w QED – i bywają piekielnie trudne w obsłudze.

Jedną z zaskakujących cech chromodynamiki kwantowej jest to, że w wyższych energiach staje się prostsza. Stała sprzężenia wcale nie jest stała, lecz maleje. Dodatkowe gluony stają się mniej prawdopodobne. W dostatecznie wysokich energiach kwark może zostać niemal zupełnie wybity z hadronu – to własność znana jako „swoboda asymptotyczna", udowodniona w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku przez Davida Grossa, Franka Wilczka i Davida Politzera, którzy w 2004 roku otrzymali za to Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

Jest również druga strona medalu: skoro w wysokich energiach oddziaływanie silne jest słabsze, w niższych energiach musi być silniejsze. Wylatujące z obszaru zderzenia kwarki zaczynają emitować gluony, α_s rośnie z 1/8 do 1/4, 1/2, a wreszcie do niemal 1 – co oznacza blisko 100-procentowe prawdopodobieństwo emisji gluonu, potem następnego i następnego i tak dalej. Niemożliwe staje się wykorzystanie do obliczeń diagramów Feynmana i zamiast nich używa się modeli strun gluonowych. Jeżeli rozciągające się między kwarkami struny zostaną zbyt mocno napięte, pękną i zwiążą wszystko w bezbarwnych hadronach. To jest uwięzienie... i proces hadronizacji.

Właściwie wciąż jeszcze nie mamy rygorystycznego matematycznego dowodu, że uwięzienie wynika z reguł chromodynamiki kwantowej, jednak wszystko wskazuje na to, że tak właśnie się dzieje. Znajdujący się w USA Instytut Matematyczny Claya wybrał to zagadnienie jako jeden z siedmiu „problemów milenijnych" i oferuje milion dolarów każdemu, kto potrafi dostarczyć dowód na uwięzienie w problemie znanym jako „problem luki widmowej". Być może jednak z końcem 2015 roku zdobycie tej nagrody stało się nieco trudniejsze, ponieważ wykazano, że ogólny problem luki widmowej jest „nierozstrzygalny" – techniczny termin oznaczający, że coś jest nie do udowodnienia. Swoją drogą, chyba tylko w matematyce możliwe jest udowodnienie, że czegoś nie da się udowodnić! Nie wiadomo jednak, czy to oznacza, że nierozstrzygalny jest również szczególny przypadek uwięzienia w QCD, i jak dotąd nagroda wciąż jest do zgarnięcia.

To klasyczny przykład dociekań naukowych: jest „łatwy" problem, który potrafimy rozwiązać (swoboda asymptotyczna), i „trudny", którego nie potrafimy rozwiązać (uwięzienie). Istnieje pewien stary dowcip o gospodyni, która chce zwiększyć w swoim gospodarstwie produkcję mleka. Zwraca się z tym pytaniem do czołowych naukowców z lokalnego uniwersytetu i po pewnym czasie wraca do niej podekscytowany fizyk. „Mam doskonałe rozwiązanie! Chociaż działa ono tylko w odniesieniu do pozbawionych tarcia, sferycznych krów w próżni". Nie jest to klasyka, ale w tym pomyśle pobrzmiewa prawda – chciałoby się zamienić trudny problem w łatwy,

upraszczając w nim wszystko, co możliwe... tylko czy wtedy rozwiązanie ma jeszcze związek ze światem rzeczywistym? Wielu naukowców tak właśnie uprawia naukę: wymyśla modele, testuje je, ulepsza, powtarza czynności.

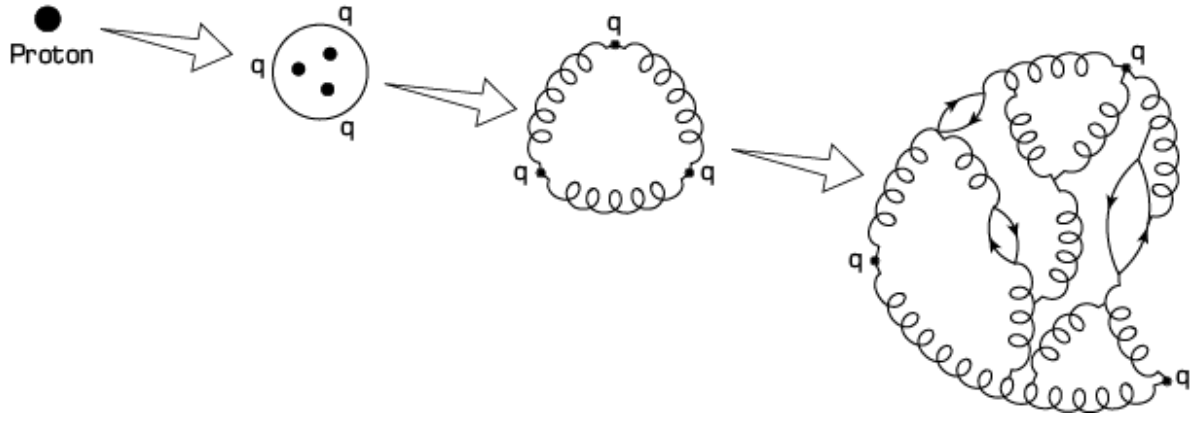
QCD to krowa realnie istniejąca. Obliczenia w LHC wymagają zszycia z sobą dwóch ekstremów: precyzyjnych obliczeń opartych na diagramach Feynmana w początkowej fazie zderzenia, które potrafimy wykonać, oraz modelu strun gluonowych w końcowej fazie zderzenia, dla którego nie potrafimy znaleźć rozwiązań – wraz z kilkoma innymi modelami, żeby te dwie skrajności jakoś z sobą zetknąć. Zagadnienie to zapewniło trwającą wiele lat rozległą aktywność teoretyczną oraz jeden z największych sukcesów w rozumieniu zachowania oddziaływania silnego. Jednak ponieważ obliczenia te opierają się na modelach, wymagają kalibracji, „dostrojenia" do rzeczywistości. Jedne z pierwszych pomiarów, jakich dokonaliśmy jako fizycy doświadczalni, polegały na wyznaczeniu podstawowych parametrów w rodzaju liczby wyprodukowanych w zderzeniu hadronów, po czym dostrojeniu modeli w taki sposób, żeby pasowały do wyników. I po pewnym dostrojeniu obliczenia mogą z powodzeniem opisywać szeroki wachlarz zjawisk, jakie mogą się wydarzyć w LHC. Ma to zasadnicze znaczenie, ponieważ jeżeli nie rozumiemy podstawowej fizyki w przebiegu przeciętnego zderzenia, możemy niemal pożegnać się z nadzieją, że uda się zauważyć bardzo rzadkie zderzenia, w których gdzieś pośród tego chaosu powstały nowe cząstki egzotyczne.

Pewne postępy poczyniono dzięki zastosowaniu innych metod do modelowania QCD w niskich energiach, znanych jako QCD na sieci. Zamiast dzielić obliczenia na liczne coraz to bardziej i bardziej skomplikowane diagramy Feynmana, chromodynamika kwantowa na sieci dzieli przestrzeń na wiele punktów, z których każdy oddziałuje ze swoim sąsiadem. To bardzo intensywne obliczenia, wymagające długiego czasu pracy dużych superkomputerów, ale pozwalają otrzymać wyniki, które są niemożliwe do uzyskania w inny sposób, takie jak przewidywanie mas i własności różnych hadronów czy istnienia kul gluonowych i pentakwarków. A w przyszłości, gdy obliczenia zostaną ulepszone, będzie można zastosować je do

jeszcze bardziej realistycznego opisu zderzeń w LHC, ograniczając zakres „dostrajania”, które jest wymagane dzisiaj.

Życie wewnątrz protonu

Chromodynamika kwantowa zdecydowanie więcej mówi nam również o tym, co się dzieje wewnątrz hadronu. Weźmy proton, cząstkę, którą zderzamy w LHC. Z daleka sprawia wrażenie jednolitego obiektu. Przyjrzyjmy się nieco bliżej, a zobaczymy kwarki. Prosty model protonu przewiduje trzy kwarki: górny, górny i dolny. Jednak zgodnie z chromodynamiką kwantową kwarki mogą nieustannie zmieniać kolor, wymieniając gluony, które działają niczym wciąż przełączające się maleńkie lewarki w dobrze wyważonej maszynie, a kiedy przyjrzymy się bliżej, dostrzeżemy również i te gluony. Patrząc jeszcze uważniej, zauważymy, że niektóre z gluonów czasowo zamieniają się w krótko żyjące pary kwark-antykwark, znane nam z pętli w diagramach Feynmana. Im bliżej się przyglądamy, tym więcej się dzieje, a zderzenia w LHC są wrażliwe na tę strukturę subtelną: w większości dotyczą gluonów, ale mogą wybić też jeden z głównych kwarków, a nawet niektóre z krótko żyjących kwarków i antykwarków.



Kolejne powiększenia protonu

W protonie dzieje się mnóstwo rzeczy, a ściśnięte na tak małym obszarze cząstki mają skłonność do dziwacznych zachowań, co po raz pierwszy uświadomił sobie Heisenberg, proponując w 1927 roku zasadę nieoznaczoności – pomysł, o którym bardziej szczegółowo opowiem w dalszej części książki. Heisenberga nie niepokoiło w owym czasie oddziaływanie silne, ale chciał zrozumieć, jak elektrony zachowują się wewnątrz atomów. Fizyka klasyczna mówi, że powinny ruchem spiralnym spadać na jądro, tymczasem tak się nie dzieje. W odpowiedzi Heisenberg zaproponował zasadę nieoznaczoności, która mówi, że niemożliwe jest jednoczesne określenie położenia i pędu cząstki. Kiedy oddziaływanie elektromagnetyczne zaczyna ściągać elektron na ciaśniejszą orbitę, jego pęd rośnie i elektron wraca na swoje miejsce. Orbity elektronów to ciągłe zawody w przeciąganiu liny, tak jak próbując ścisnąć balon, powodujemy tylko, że wybrzuszenie pojawia się gdzie indziej. Gdyby oddziaływanie elektromagnetyczne było trochę silniejsze, przyciągnęłoby elektrony bliżej – w rezultacie atomy byłyby znacznie mniejsze.

To samo spotyka kwarki wewnątrz protonu, ale ponieważ oddziaływanie silne jest znacznie silniejsze, potrafi ścisnąć kwarki w dużo mniejszej przestrzeni: proton jest blisko 10 000 razy mniejszy niż orbity elektronów w atomie. A ponieważ kwarki są ograniczone do znacznie mniejszej przestrzeni, zasada nieoznaczoności mówi, że muszą mieć bardzo duży pęd – kwarki wewnątrz protonu tłuką się niczym zwierzęta w klatce, poruszając się swobodnie tak długo, jak długo w próbie ucieczki nie natrafią na pręty klatki. Wówczas gluony przyciągają je z powrotem.

Ten nieustanny, bardzo szybki ruch wewnątrz hadronów ma inne, niezwykle ważne dla nas konsekwencje. Zgodnie z zapisanym przez Einsteina równaniem $E = mc^2$, masa i energia są sobie równoważne. I rzeczywiście, energia ruchu kwarków i gluonów wewnątrz hadronów przejawia się jako masa hadronów. Ponad 95 procent masy protonów i neutronów pochodzi nie z masy samych kwarków, ale z „energii wiązania”, szybkich ruchów kwarków, więzionych w ciasnej przestrzeni przez siły chromodynamiki kwantowej. Inaczej

mówiąc, w rzeczywistości hadrony w rodzaju protonów i neutronów powinny być lekkie, ale energia potrzebna do utrzymania kwarków w tak małej przestrzeni sprawia, że są ciężkie.

Protony i neutrony są znacznie cięższe niż elektrony i odpowiadają za przeważającą część masy w atomach. A masa atomów odpowiada za masę wszystkiego, co jest zrobione z atomów: twoją, moją i wszystkiego innego na świecie. Ponad 95 procent masy wszystkiego wokół nas bierze się z QCD i tej dziwacznej własności, jaką jest uwięzienie. A pozostałe 5 procent? Odpowiada za nie bozon Higgsa, do którego wrócimy w dalszej części książki.

W chromodynamice kwantowej ma swoje źródło wiele innych dziwnych zjawisk. Choć zazwyczaj LHC zderza z sobą protony, przez kilka tygodni każdego roku bada kolizje jąder ołowiu – wciąż maciupeńkich w skali Wszechświata, ale naprawdę wielkich w kategoriach fizyki cząstek, zawierających 82 protony i ponad 120 neutronów. Podczas tych zderzeń czasowo dochodzi do wytworzenia najwyższych temperatur, jakie kiedykolwiek zarejestrowano w laboratorium – kilku bilionów stopni Celsjusza – i całkowicie odmiennego stanu materii, w którym jądra wydają się topić do postaci zupy, znanej jako plazma kwarkowo-gluonowa. W badaniach tego zjawiska w LHC specjalizuje się detektor ALICE (ang. A Large Ion Collider Experiment – Eksperyment przy Wielkim Zderzaczu Jonów). Możliwe, że tuż po Wielkim Wybuchu, kiedy cała materia była ściśnięta w maleńkiej przestrzeni, Wszechświat wypełniony był taką plazmą, toteż badania nad jej zachowaniem mogą dostarczyć cennych informacji o ewolucji Wszechświata oraz odpowiedzieć na pytanie, dlaczego świat wokół nas jest taki, jaki jest.

Ukryta siła

W niniejszym rozdziale odbyliśmy krótką podróż po zagadnieniach związanych z oddziaływaniem silnym, oddziaływaniem, które utrzymuje w całości jądro atomu. Przez dziesięciolecia pozostawało ono zupełną tajemnicą, jednak kiedy udało się zapoczątkować

eksperymenty z rozbijaniem protonów, okazało się, że oddziaływanie silne jest zaskakująco dynamiczne i skomplikowane. Teoria oddziaływania silnego, chromodynamika kwantowa, z początku mocno nawiązywała do elektrodynamiki kwantowej: obydwie opisują siłę przenoszoną przez bozony, które wędrują między naładowanymi cząstkami. Dodanie do QCD jednej dodatkowej reguły – zgodnie z którą bozony oddziaływania silnego również przenoszą ładunek kolorowy – nadało temu oddziaływaniu całkowicie odmienny charakter. Przy czym jest to charakter ulegający zmianom: od swobody asymptotycznej w wysokich energiach do uwięzienia w niskich energiach.

Te różne twarze chromodynamiki kwantowej czynią z niej fascynującą dziedzinę, toteż dużą część swoich badań poświęciłem testowaniu jej przewidywań dla granicznych wartości energii. Sytuacja jest o tyle dziwna, że wszystkie przewidywania bazują na zjawiskach, których nigdy nie zobaczymy bezpośrednio. Uwięzienie oznacza, że kwarki i gluony zawsze są uwiązane wewnątrz hadronów, zawsze zamknięte poza polem widzenia. QCD pracuje jak mechanizm zegarowy, ale my widzimy tylko cyferblat zegara, nigdy zaś nie zaobserwujemy kręcących się pod spodem kółek. A zatem czy coś, czego nie możemy zmierzyć, rzeczywiście istnieje? Było to ważne pytanie w okresie narodzin chromodynamiki kwantowej, lecz teraz praktycznie nie ma już żadnych wątpliwości. Gdyby te kwarki i gluony nie istniały, zderzenia w LHC wyglądałyby całkiem inaczej i do ich opisu potrzebowalibyśmy całkiem innej teorii.

Niemniej jednak sama siła oddziaływań silnych sprawia, że obliczenia z użyciem tej teorii są znacznie trudniejsze, wobec czego bazujemy raczej na kombinacji precyzyjnych diagramów Feynmana z modelami strun gluonowych. Podobnie jak QED, chromodynamika kwantowa naprawdę działa, z dużą dokładnością przewidując wyniki zderzeń w LHC, a także wiele innych aspektów oddziaływania silnego. Uwięzienie mówi nam również, że większość masy w świecie wokół nas w rzeczywistości bierze się z oddziaływania silnego, które upycha kwarki wewnątrz maleńkich protonów i neutronów, oraz że wnętrza tych hadronów ulegają ciągłym zmianom. Może się wydawać, że oddziaływanie silne przez większą część czasu

pozostaje bierne, ale wystarczy zajrzeć w głąb pudełka, a naszym oczom ukaże się całkiem inny świat – bez tego oddziaływania Wszechświat byłby zupełnie odmiennym miejscem.

Następny rozdział opowiada o kolejnym oddziaływaniu w Modelu Standardowym, znowu podobnym, a jednak innym, i równie ważnym w kształtowaniu świata wokół nas.

ROZDZIAŁ 5

SŁABA JEST SIŁA

Mając oddziaływanie silne, spajające jądro atomowe, oraz oddziaływanie elektromagnetyczne, utrzymujące elektrony na orbitach wokół jądra, ściskamy w ręku podstawowe narzędzia, pozwalające objaśnić bardzo dużą część otaczającego nas świata fizycznego. Jest jednak jeszcze jedno oddziaływanie, które stanowi uzupełnienie obrazu i jest zapewne najdziwniejszym elementem zjawisk zachodzących w świecie cząstek subatomowych. Chodzi o oddziaływanie słabe i choć wydaje się, że jest ono rzeczywiście bardzo słabe, to jednak okazuje się, że stanowi absolutnie newralgiczny składnik Modelu Standardowego i konstrukcji Wszechświata. To dzięki niemu świeci Słońce, to ono tłumaczy, dlaczego wszystko zbudowane jest z protonów, neutronów i elektronów – gdyby nie oddziaływanie słabe, zwyczajnie by nas tutaj nie było.

Demaskatorskie promieniowanie

Pierwsze wskazówki świadczące o istnieniu oddziaływania słabego pojawiły się wraz z obserwacjami rozpadu beta, będącego źródłem jednego z rodzajów promieniowania sklasyfikowanych przez Rutherforda w 1899 roku, jednak podobnie jak było to w wypadku oddziaływania silnego, proponowano różne modele objaśniające, ale nie rozumiano w pełni, czym jest siła oddziaływania słabego, zanim w 1968 roku pojawił się Model Standardowy. Choć rozdział ten

bardziej jest podsumowaniem naszej aktualnej wiedzy, a nie opowieścią o tym, jak do tej wiedzy doszliśmy, rozpad beta jest jednym z najbardziej oczywistych przykładów oddziaływania słabego, zacznę więc właśnie od niego.

Wyróżniamy cztery główne rodzaje promieniowania: alfa, beta, gamma i neutronowe (Rutherford jeszcze nie wiedział wówczas o neutronach, toteż nie nazwał ich grecką literą delta). Ogólnie rzecz biorąc, do emisji promieniowania dochodzi, gdy z jakiegoś powodu jądro atomu jest wytrącone z równowagi i przesuwa się do bardziej stabilnej konfiguracji. Dość często zdarza się, że zanim jądro ostatecznie się ustabilizuje, dochodzi do emisji jednego rodzaju promieniowania za drugim.

Przede wszystkim protony i neutrony mogą się zwyczajnie przemieszać, tak aby tworzona przez nie struktura była bardziej zwarta. Trochę przypomina to pakowanie walizki – łatwiej znaleźć miejsce dla ubrań, gdy są schludnie poskładane, a nie bezładnie rzucone na stertę. Kiedy jądro dokonuje takiego przemeblowania, uwalnia energię w postaci wysokoenergetycznego fotonu (promieniowanie gamma). Czasem przekładanie rzeczy na nowe miejsce nie wystarcza – nijak nie można domknąć walizki bez wyjęcia tego swetra z grubej wełny. W takich sytuacjach może dojść do oderwania kawałka jądra w postaci cząstki alfa, którą stanowią dwa protony i dwa neutrony. Jądro może też zdecydować, że co dwie walizki, to nie jedna – wówczas rozpadnie się na dwa mniejsze jądra, gubiąc przy okazji kilka neutronów. Taki proces rozszczepienia jądra atomu jest źródłem energii pozyskiwanej w elektrowniach jądrowych.

Czasem jednak lepszym wyjściem jest spakowanie zupełnie innego zestawu i pozbycie się krawata, który do niczego już nie pasuje. Taki jest rozpad beta: jądro przebudowuje się, zamieniając jeden neutron w proton i emitując cząstkę beta, czyli elektron. Rozpad beta może przebiegać jeszcze inaczej: proton przemieni się w neutron, a wyemitowany zostanie antyelektron – jest to jeden z procesów zasilających Słońce i inne gwiazdy we Wszechświecie. W obu wypadkach łączna liczba protonów i neutronów w jądrze pozostaje

stała, zmienia się tylko ich proporcja, lecz jądro staje się stabilniejsze.

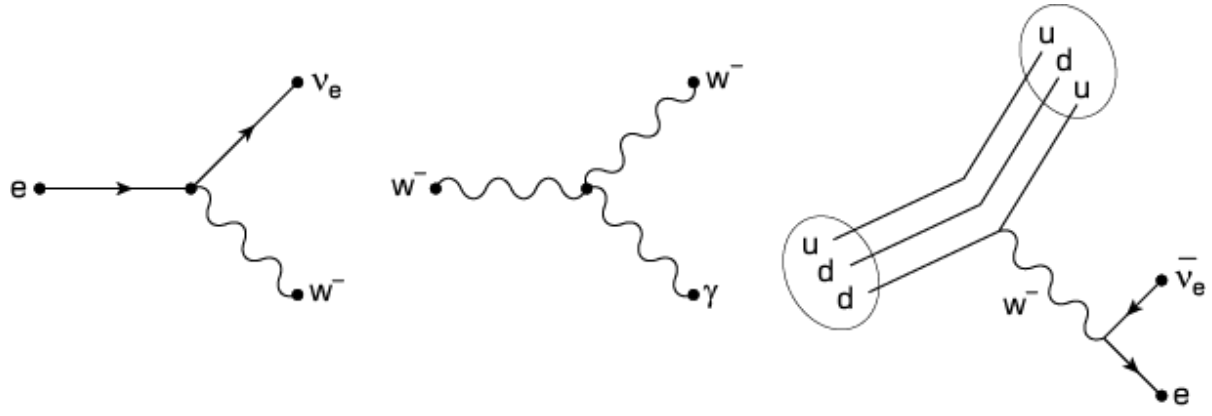
Model kwarkowy wyjaśnia nam, co musi się dziać w rozpadzie beta. Proton składa się z trzech kwarków: górnego, górnego, dolnego (na tę chwilę pominę wszystkie dodatkowe gluony, kwarki i antykwarki, które mogą się pojawić, gdy w LHC dochodzi do zderzenia dwóch protonów). Neutron również składa się z trzech kwarków: górnego, dolnego, dolnego. Kiedy więc neutron zamienia się w proton, jeden z kwarków dolnych musi zmienić się w kwark górny. Gdzieś przy okazji powstaje jeszcze elektron.

Problem w tym, że nie można tego objaśnić, odwołując się do teorii, które do tej pory spotkaliśmy. Siły elektromagnetyczne sprawiają, że cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym oddziałują z sobą, ale cząstki pozostają sobą, nieważne, jak wiele krąży wokół nich fotonów. Oddziaływanie silne może zmienić „kolor" kwarka, ale w takich wypadkach rodzaj kwarka zawsze pozostaje bez zmian. Nie znamy takiej siły lub oddziaływania zachodzącego między cząstkami, które mogłoby zmienić kwark dolny w kwark górny. Nie ma takiego diagramu Feynmana, który zdołalibyśmy narysować jako objaśnienie rozpadu beta. Aby sobie z tym poradzić, potrzebujemy nowego typu oddziaływania, nowej siły. Odpowiedzią jest oddziaływanie słabe.

Jak wszystkie oddziaływania, to również ma swoją cząstkę pośredniczącą, która jest bozonem. W tym wypadku jest to bozon W (tak, tak, W dlatego, że *weak* – słaby), charakteryzujący się pewną wyjątkową właściwością – potrafi zamienić jedną cząstkę w drugą. Kiedy kwark dolny emituje bozon W, zamienia się w kwark górny. Ponieważ kwark dolny przenosi ładunek równy –1/3 jednostkowego ładunku elektrycznego, natomiast kwark górny +2/3 jednostkowego ładunku, bozon W musi unosić ładunek równy –1. Bozon W musi być obdarzony ładunkiem elektrycznym. Wówczas może ulec rozpadowi, w którym powstaje elektron, cząstka beta – to od niej wszystko się zaczęło.

Precyzyjne pomiary rozpadu beta pokazały, że z takim opisem wiąże się pewien kłopot: wyglądało na to, że elektron nie unosi całej energii, jaka zostaje uwolniona, gdy neutron zamienia się w proton. To na tej podstawie w 1930 roku Wolfgang Pauli przewidział, że oprócz elektronu w rozpadzie beta powstaje nowa i nieznana do tej pory cząstka – neutrino (w tym wypadku konkretnie antyneutrino). To ona unosi resztę energii. Dzięki niej obraz rozpadu beta stał się bardziej zrównoważony, w większym stopniu kojarzący się z diagramami Feynmana, jakie widzieliśmy dla QED i QCD: po jednej stronie cząstka emituje bozon, następnie bozon ten zamienia się w parę: cząstka i antycząstka (neutrino oznacza się symbolem ν).

Na bazie diagramów Feynmana dla oddziaływania słabego można zbudować całą teorię. Są one podobne do diagramów Feynmana dla QED, z tym wyjątkiem, że w wierzchołku W dochodzi do zmiany typu cząstki. W wypadku oddziaływania słabego jest jeszcze jeden wierzchołek: ponieważ bozon W obdarzony jest ładunkiem elektrycznym, może on też oddziaływać z fotonem. Oddziaływania słabe zachodzą bardzo rzadko, nawet więc najprostszy możliwy diagram Feynmana bardzo trafnie obrazuje, co się dzieje – szansa na to, aby doszło do bardziej skomplikowanego oddziaływania z udziałem kilku bozonów W, jest tak mała, że takie sytuacje można całkowicie pominąć. Tak więc poniższy diagram stanowi w miarę pełną opowieść o rozpadzie beta:



Od lewej: diagramy Feynmana składowych oddziaływania słabego. Po prawej stronie: diagram Feynmana rozpadu beta.

Nie dostrzegamy w rozpadzie beta antyneutrina dlatego, że nie przenosi ono ładunku elektrycznego i nie ma ładunku kolorowego, uczestniczy jedynie w oddziaływaniach słabych. Oznacza to, że oddziałuje tak rzadko, iż Pauli stwierdził: „Zrobiłem straszną rzecz. Zaproponowałem cząstkę, której nie da się wykryć". Eksperymentatorzy jednak podjęli wyzwanie i 26 lat później Clyde Cowan i Frederick Reines dokonali czegoś, co Pauli uważał za niemożliwe: zarejestrowali neutrina. Powrócimy do neutrin w rozdziale 8, ponieważ obecnie znajdują się one w centrum zainteresowania najaktywniejszych badaczy na polu fizyki cząstek.

Dlaczego oddziaływanie słabe jest słabe

Kiedy mówię, że oddziaływanie słabe jest słabe, mam na myśli to, że zachodzi ono rzadko. Do rozpadu beta może dochodzić w perspektywie sekund, godzin, a nawet miliardów lat. Jednakże o oddziaływaniu słabym powinniśmy wiedzieć to, że wcale nie musi być słabe – gdyby wszystko było sobie równe, oddziaływanie to powinno być znacznie ważniejsze niż oddziaływanie elektromagnetyczne, które w naszym świecie odgrywa tak istotną rolę. Stała sprzężenia, α, dla oddziaływania słabego jest około pięciu razy większa niż stała dla QED o wartości 1/137. Tylko że wszystko nie jest sobie równe.

Rozpad beta jest jednym z wielu możliwych rodzajów rozpadu cząstek i dwa główne czynniki decydują, jak szybko dany rozpad zachodzi. Pierwszy czynnik po prostu związany jest z tym, w jakim stopniu dany rozpad jest korzystny. Neutron jest zaledwie 0,1 procent cięższy od protonu, kiedy więc w wyniku rozpadu beta zamienia się w proton, część nadwyżki masy zamieniana jest na lżejszy elektron i antyneutrino, a reszta, zgodnie ze wzorem $E = mc^2$, przekształca się w energię: lżejsze cząstki oddalają się z miejsca rozpadu, niczym szczątki rozrzucane przez eksplozję. Wiele innych cząstek może ulegać rozpadowi w podobny sposób,

od mionów po najcięższe z nich, kwarki wysokie. Reakcja jest tym korzystniejsza, im cięższa jest ulegająca rozpadowi cząstka i im lżejsze są powstające w wyniku rozpadu cząstki. Można tu nakreślić analogię do – wierzcie lub nie – sklepu sprzedającego telewizory najwyższej klasy. W normalnych warunkach te bardzo drogie modele nie są kupowane za często. Jeżeli sklep zaoferuje rabat w wysokości 20 procent, sprzedaż zapewne wzrośnie. Jeśli rabat wyniesie 50 procent, telewizory będą sprzedawać się szybciej. Przy rabacie sięgającym 90 procent będą znikać z półek jak ciepłe bułeczki. Jeżeli równocześnie w sprzedaży jest model średniej klasy, ale jego cena jest taka sama jak sprzętu najwyższej klasy, model ten nie będzie sprzedawał się równie dobrze. Rozpad dokonuje się według tego samego wzorca: im wyższa jest początkowa cena (masa cząstki ulegającej rozpadowi) i niższa cena po rabacie (suma mas cząstek powstałych w wyniku rozpadu), tym szybciej dojdzie do rozpadu. Rozpad beta jest niczym średniej klasy telewizor – w jego wypadku „rabat" jest mniejszy i przez to zachodzi rzadziej niż niektóre inne rodzaje rozpadów cząstek.

Rabat jest istotnym czynnikiem, ale nie jest głównym powodem tego, że oddziaływanie słabe robi wrażenie słabego. Wielkim zaskoczeniem w wypadku bozonów W jest to, że w przeciwieństwie do fotonu i gluonu mają one masę. W rzeczywistości są bardzo ciężkie: jakieś 85 razy cięższe od protonu. Aby się przekonać, jak wpływa to na rozpad cząstek, powiedzmy, że sklep oferuje rabat w wysokości 90 procent ceny telewizora, ale jest zobowiązany dostarczyć towar do domu klienta. Koszt tej obowiązkowej dostawy jest 85 razy większy niż pierwotna cena urządzenia. W jednej chwili transakcja przestaje być atrakcyjna. Właśnie to dzieje się z rozpadami beta: bozon W jest skrajnie ciężki, a gdzieś trzeba znaleźć energię, aby wytworzyć taki bozon. Przyjrzyjmy się jeszcze raz rozpadowi beta – zaczynamy od neutronu, a potem, gdzieś w połowie tego procesu, mamy proton i skrajnie ciężki bozon W. Wydaje się, że dużo masy pojawiło się zupełnie znikąd. W reakcji takiej jak ta możemy mieć wystarczająco dużo pieniędzy, aby kupić telewizor, czyli uzyskiwane na końcu elektron i neutrino, ale nie będzie nas stać na opłacenie transportu, czyli bozon W. Rozpad beta

jest czymś, co jest niemożliwe. Oddziaływanie słabe wcale nie musi być słabe i wszystko to w ogóle nie powinno się zdarzyć!

Naginanie praw fizyki

Jest jeszcze jeden element mechaniki kwantowej, który można dostrzec w rozpadzie beta i który należy uwzględnić w naszej analizie diagramów Feynmana. Popatrzmy jeszcze raz – pośrodku diagramu jest bozon W, ale tak naprawdę nigdy nie udało nam się dokonać jego pomiaru. Bozon W jest emitowany przez kwark, potem rozpada się na elektron i antyneutrino. Cząstki takie jak ta, uwięzione pośrodku diagramów Feynmana, nazywa się „cząstkami wirtualnymi". Nigdy nie możemy dokonać bezpośredniego pomiaru tych cząstek wirtualnych i okazuje się, że nie muszą one nawet podporządkowywać się prawom fizyki.

W fizyce funkcjonuje zaledwie kilka najważniejszych, zasad, którym podlega wszystko i które mówią nam coś istotnego o samym Wszechświecie. Zasady te na ogół zakładają, że pewne rzeczy pozostają stałe, nie zmieniają się wraz z upływem czasu. Jedną z takich zasad jest zasada zachowania energii. W gruncie rzeczy energia nigdzie nie ginie. Jeżeli na starcie mamy jakąś energię, to na końcu jej wartość musi być taka sama. Większość tego, co robimy, wykorzystuje zamianę jednej formy energii w drugą: czajnik elektryczny zamienia energię elektryczną na ciepło, rośliny zamieniają energię słoneczną w cukry i inne cząsteczki magazynujące energię, samochody spalają paliwo i zamieniają część energii chemicznej w energię kinetyczną (ruch). We wszystkich tych przykładach całkowita ilość energii pozostaje jednak stała. Nie można zagotować wody w czajniku bez elektryczności, nie da się rozpędzić samochodu bez spalania paliwa – aby wydobyć energię, trzeba ją najpierw skądś pozyskać. Zasada ta obowiązuje we Wszechświecie wszędzie, na równi dotyczy zachowania ciał tak małych jak atomy, jak i ruchu galaktyk oraz wszystkich obiektów o rozmiarach większych od atomu i mniejszych od galaktyk.

Absolutnie wszystkich ciał... z wyjątkiem cząstek wirtualnych. Cząstek z diagramów Feynmana, których nie możemy objąć pomiarem.

Jest to jeszcze jeden przykład implikacji wynikających z zasady nieoznaczoności Heisenberga, z którą zetknęliśmy się w poprzednim rozdziale. Mówi ona, że jeśli zamknie się cząstki w bardzo małej przestrzeni, to będą one próbowały uciec. Mówi też, że cząstkom wirtualnym wolno naginać zasady i pożyczać niewielką ilość energii na krótki czas. To właśnie czyni rozpad beta możliwym i sprawia, że oddziaływanie słabe realnie istnieje: pożyczona energia może być wykorzystana do stworzenia bozonu W, co działa jak krótkoterminowy kredyt na pokrycie kosztów dostawy. Im więcej jednak trzeba pożyczyć, tym mniej prawdopodobne staje się to wszystko, a do wytworzenia bozonu W potrzeba mnóstwa energii – to sprawia, że oddziaływania słabe są taką rzadkością. Pożyczanie tak dużej ilości energii oznacza też, że spłata musi nastąpić bardzo szybko. Bozon W może istnieć tylko przez mały ułamek sekundy, zanim energia zostanie zwrócona i wszystko wróci do równowagi. Z powodu tego ograniczenia czasowego oddziaływania słabe mogą zachodzić jedynie na wyjątkowo krótkich dystansach, około jednej miliardowej z jednej miliardowej części metra. To odcinek mniejszy niż średnica atomu, mniejszy niż średnica jądra, a nawet jeszcze jakieś tysiąc razy mniejszy niż średnica protonu.

Oba wspomniane czynniki (rabat od ceny sprzedaży i kredyt potrzebny na pokrycie kosztów dostawy) wpływają na czas życia wielu niestabilnych cząstek. Neutron żyje średnio około 15 minut – średnio, ponieważ rozpad ten jest procesem kwantowym i czas, w którym ulegnie rozpadowi konkretny neutron, jest zależny od czynników losowych. Wewnątrz jądra atomowego na równowagę energetyczną wpływa oddziaływanie elektryczne i neutrony mogą stać się całkowicie stabilne – dobra wiadomość dla atomu! Kiedy mion ulega rozpadowi na elektron, uwalnia znacznie więcej energii, toteż mion żyje średnio zaledwie przez kilka mikrosekund, ale jest to czas dostatecznie długi, aby pokonać wiele kilometrów. Inne ciężkie cząstki odkryte w akceleratorach, takie jak należący do leptonów taon lub hadrony zawierające kwarki powabny i niski, uwalniają

w trakcie rozpadu jeszcze więcej energii i żyją tylko przez nanosekundy, pokonując zaledwie kilka milimetrów lub mniej, zanim ulegną rozpadowi.

Pary cząstek

O oddziaływaniach wiemy jeszcze, że mogą uczestniczyć w nich tylko cząstki, które przenoszą właściwy ładunek. Kwarki przenoszą ładunek kolorowy, dlatego uczestniczą w oddziaływaniach silnych. Niemal wszystkie cząstki obdarzone są ładunkiem elektrycznym, uczestniczą więc w oddziaływaniach elektromagnetycznych. Dla oddziaływań słabych musi istnieć odpowiadający im „ładunek słaby", przenoszony przez wszystkie fermiony, wszystkie kwarki i leptony. I tak jak natura ładunku kolorowego miała zasadnicze znaczenie dla cech oddziaływania silnego, ładunek słaby również musi mieć unikatowy charakter.

W poprzednim rozdziale wskazywałem na fakt, że ładunek elektryczny jest „jednowymiarowy", podczas gdy ładunek kolorowy jest „trójwymiarowy". Cząstka przenosząca jednostkowy ładunek elektryczny niczym nie różni się w tym względzie od jakiejkolwiek innej cząstki obdarzonej takim samym ładunkiem, tymczasem ta przenosząca jednostkowy ładunek kolorowy może wskazywać jeden z trzech kierunków – „czerwony", „zielony" lub „niebieski" – a gluony potrafią zmieniać ten kolor, jak robi to wiatrowskaz przy podmuchach wiatru. Ładunek słaby lokuje się gdzieś pomiędzy nimi, jest bowiem „dwuwymiarowy". Ładunek słaby może reprezentować dwa możliwe stany, podobnie jak moneta. Wszystkie fermiony występują parami, orły i reszki ładunku słabego, a bozon W potrafi zamienić jeden w drugi, jakby rzucał monetą.

Już na podstawie analizy rozpadu beta możliwe jest rozpoczęcie grupowania elementów w pary wyznaczane przez ładunek słaby. Kwarki górny i dolny muszą stanowić parę, ponieważ w trakcie rozpadu beta bozon W zamienia jeden z nich w drugi. Patrząc na rozpad beta z drugiej strony, dochodzimy do wniosku, że kolejną

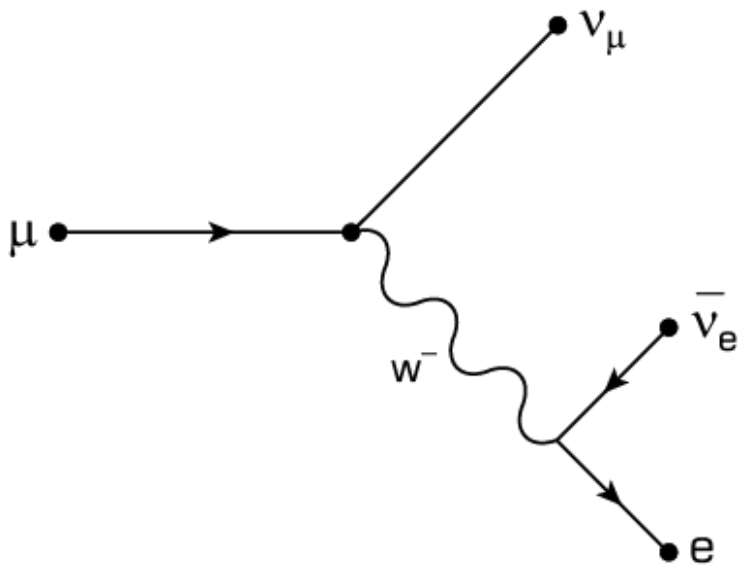
parę muszą stanowić elektron i neutrino. Wszystkie znane nam cząstki należą do takich par, muszą więc istnieć trzy rodzaje neutrin: neutrino elektronowe (ν_e), będące partnerem elektronu, neutrino mionowe (ν_μ), partner mionu, a także neutrino taonowe (ν_τ), partner taonu. Kwarki również łączą się w pary: dziwny i powabny, górny i dolny, i tak dalej. Orzeł lub reszka, jak dwie strony monety, z tym że bozon W ma zdolność przerzucenia monety na drugą stronę. Te słabe pary stanowią ostatni brakujący składnik Modelu Standardowego – do tej pory fermiony zostały pogrupowane na kwarki (wrażliwe na oddziaływanie silne) i leptony (które nie uczestniczą w oddziaływaniach silnych), a teraz doszła trzecia grupa, tworzona przez opisane słabe pary, będące dwiema stronami tej samej monety.

Funkcjonowanie par cząstek zostało wykorzystane do formułowania przewidywań na temat istnienia cząstek, których jeszcze nie znaleziono. Kwark dziwny odkryto w eksperymentach nad promieniowaniem kosmicznym i kiedy w 1970 roku rozwinięto model oddziaływań słabych, zdano sobie sprawę z tego, że kwark ten musi mieć partnera – kwark powabny, który zaobserwowano cztery lata później. Kwark niski został odkryty w 1977 roku, ale później trzeba było czekać osiemnaście lat, aby pojawiły się akceleratory na tyle potężne, że zdołano wytworzyć jego partnera, kwark wysoki, najcięższą znaną cząstkę. Na koniec, w 1975 roku, odkryto należący do leptonów taon, który również ma partnera w postaci neutrina taonowego. Neutrina tak trudno zaobserwować, że istnienie tej ostatniej cząstki potwierdzono doświadczalnie dopiero w roku 2000. W ten sposób zestaw cząstek został skompletowany. Mamy trzy generacje par kwarków i trzy pary leptonów, co daje łącznie 12 cząstek Modelu Standardowego. Do tego bozon W, który dowolną cząstkę zamienia w jej partnera.

Oddziaływanie słabe tłumaczy jeszcze, dlaczego, ze względu na liczbę cząstek wchodzących w skład Modelu Standardowego, świat zbudowany jest tylko z tych najlżejszych – kwarków górnego i dolnego oraz elektronu.

Najprostszy przykład, który pozwala się o tym przekonać, to rozpad mionu. Cząstka ta może wyemitować bozon W (wirtualny) i zamienić

się w neutrino mionowe. Wówczas bozon W rozpada się na elektron i antyneutrino elektronowe. Po kilku ułamkach sekundy nie ma już mionów. To samo dotyczy taonów, które emitują bozon W, zamieniając się w neutrino taonowe, natomiast bozon W przekształci się w elektron i antyneutrino elektronowe albo w mion i antyneutrino mionowe. Po kilku nanosekundach nie ma już taonów. Tylko najlżejsze leptony przetrwają: elektron i mnóstwo neutrin – i to dlatego, że nie ma już nic lżejszego, co mogłoby powstać w wyniku ich rozpadu.



Rozpad mionu zachodzący za pośrednictwem oddziaływania słabego

Pomieszane kwarki

Tego samego możemy spróbować z kwarkami. Kwark ciężki, tak jak powabny, może wyemitować bozon W i zamienić się w lżejszego partnera, kwark dziwny. Jednak wydaje się, że przed kwarkiem dziwnym nie otwierają się już żadne możliwości – bozon W może zmienić go z powrotem w kwark powabny, ale zwykle nie powinno do tego dojść bez dodatkowej energii. Innymi słowy, kwark dziwny

powinien być stabilny, ponieważ nie ma nic lżejszego, co mogłoby powstać w wyniku jego rozpadu. To samo stwierdzenie musi być prawdziwe dla kwarka niskiego – jest to lżejszy partner kwarka wysokiego i znowu wydaje się, że nie ma sposobu, aby mógł on ulec rozpadowi. Świat powinien być pełen kwarków dziwnych i niskich. Powinniśmy znajdować je w atomach i gdyby rzeczywiście tak było, cały Wszechświat wyglądałby zupełnie inaczej.

Najwyraźniej w odniesieniu do kwarków sprawy się trochę komplikują. Podczas gdy leptony idealnie podporządkowują się schematowi par, kwarki zdają się nieco gubić. Bozon W może zamienić kwark powabny w kwark dziwny, ale może zamienić go w kwark dolny lub niski. W istocie dodatnio naładowany bozon W może przekształcić każdy dodatnio naładowany kwark (górny, powabny, wysoki) w dowolny kwark przenoszący ładunek ujemny (dolny, dziwny, niski). Ujemnie naładowany bozon W działa odwrotnie. Ilościowo stopień mieszania – na przykład jak bardzo prawdopodobne jest to, że kwark powabny przemieni się w kwark dziwny w porównaniu z przemianą w kwark dolny – można określić, badając hadrony ulegające rozpadowi przy emisji bozonu W. Eksperymenty takie jak LHCb w CERN (który doprowadził również do odkrycia pentakwarka, o czym wspomniałem w poprzednim rozdziale) specjalizują się w analizie tego rodzaju. Wyniki tych prac można podsumować za pomocą czegoś, co znane jest jako macierz CKM, której nazwa jest akronimem utworzonym od nazwisk trzech głównych pomysłodawców tej idei, Nicoli Cabibbo, Makoto Kobayashiego i Toshihide Maskawy.

Nie jest oczywiste, dlaczego oddziaływania kwarków z bozonem W są w taki sposób zamieszane. Kwarki występują w parach, najprostszym możliwym rozwiązaniem byłoby więc, aby pary te idealnie funkcjonowały również jako pary ładunku słabego. Obecnie najlepszy komentarz w sprawie tego mieszania, na jaki nas stać, sprowadza się do stwierdzenia, iż dzieje się tak dlatego, że jest to możliwe. Technicznie takie mieszanie jest możliwe, toteż rzeczywiście zachodzi w naturze. Nie jest to jakiś wielki efekt, pary kwarków niemal dokładnie odzwierciedlają pary względem bozonu W – kwark wysoki rozpada się na kwark niski w 99,8 procent wszystkich

wypadków, a kwark powabny będzie się rozpadał na kwark dziwny w 95 procent wszystkich wypadków. Model Standardowy nie dostarcza jednak żadnego wytłumaczenia, dlaczego nie jest to 100 procent albo dlaczego nie jest to jakakolwiek inna liczba. Raczej mówimy tu o „parametrach swobodnych", liczbach, których do tej pory nie potrafimy wytłumaczyć, a powody tego, że liczby te mają akurat takie, a nie inne wartości, wciąż pozostają otwartą sprawą w fizyce cząstek i powrócę do nich w rozdziale 9. Warto jednak zaznaczyć, że gdyby tego mieszania nie było, Wszechświat wyglądałby zupełnie inaczej – byłby pełen innej materii, która składałaby się z kwarków dziwnych i niskich.

Mieszanie sprawia, że bozon W może w dużej mierze wybierać, jakie kwarki będą tworzyły pary w danym oddziaływaniu, a to oznacza, że cięższe kwarki mogą brać udział w kolejnych rozpadach, aż zostanie osiągnięty poziom najlżejszych cząstek: na przykład rozpad kwarka wysokiego na niski, i dalej na powabny, i dalej na dziwny, i jeszcze dalej na kwark górny. Tak więc mieszanie jest odrobinę dziwaczne, ale odgrywa bardzo ważną rolę we Wszechświecie. W istocie działa ono również w odniesieniu do leptonów, ale przejawia się tylko przez pewne osobliwe zachowanie neutrin, o którym opowiem w rozdziale 8.

Tak oto z powodu oddziaływań słabych wszystkie ciężkie cząstki Modelu Standardowego są niestabilne. Bardzo krótko po Wielkim Wybuchu Wszechświat był niesamowicie gorący i gęsty, i musiał zawierać mnóstwo taonów, kwarków wysokich, mionów i tak dalej. Jednak za sprawą oddziaływań słabych w ułamku sekundy wszystkie te cząstki uległy rozpadowi. Przetrwały tylko najlżejsze: kwarki górny i dolny, a także elektron. To one, wraz z ogromną liczbą neutrin, tworzą otaczający nas świat. Kwarki i elektrony ostatecznie się połączyły, formując atomy, a po upływie kilku miliardów lat powstaliśmy z nich my. Jesteśmy stworzeni z zimnego pyłu, jaki pozostał po Wielkim Wybuchu.

Anatomia stworzenia

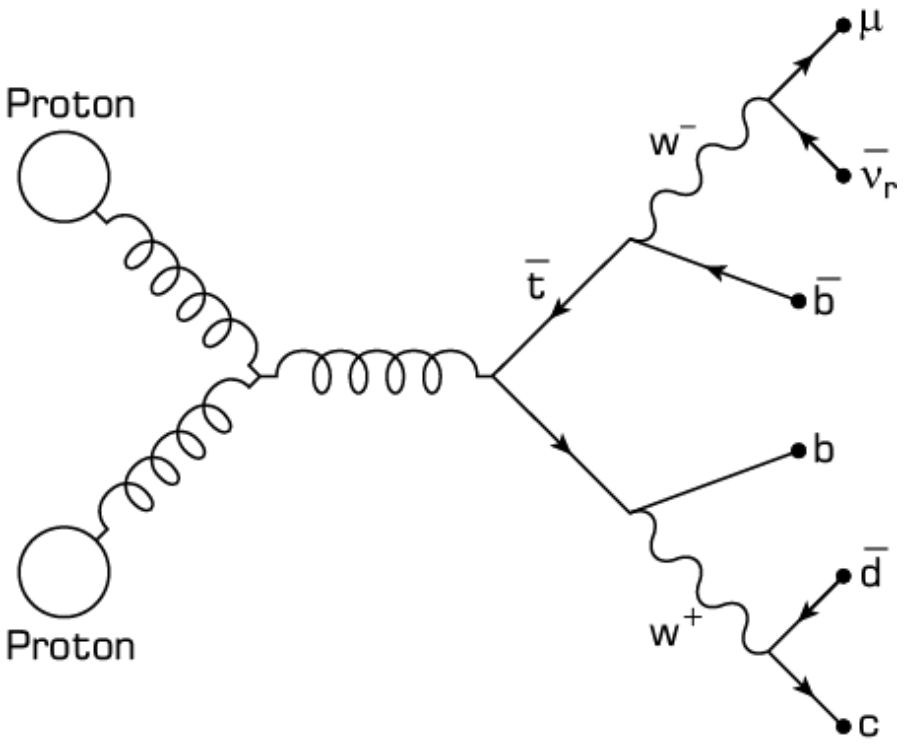
Mamy już wszystkie narzędzia, aby zrozumieć zachodzące w LHC wysokoenergetyczne zderzenia cząstek, które są podobne do nieustannych zderzeń, gdy promieniowanie kosmiczne napotyka na swej drodze ziemską atmosferę. Procesem, który pokazuje niemal wszystko, jest powstawanie pary kwarków wysokich, któremu najpierw przyjrzymy się przez pryzmat najprostszych diagramów Feynmana. Analizę można przeprowadzić na kilka sposobów, lecz ten jest najpowszechniej wykorzystywany – po lekturze mętnego opisu łańcucha zdarzeń, które następują po sobie w tym zderzeniu, powinno stać się jasne, że jeden diagram jest wart tysiąca słów!

Zanim dojdzie do zderzenia, dwa protony lecą ku sobie z prędkością bliską prędkości światła. Kiedy następuje zderzenie, może dojść do oddziaływania gluonów, które utrzymują każdy proton w całości – w wyniku ich połączenia powstanie jeden, mocno energetyczny gluon. Na jego wytworzenie idzie duża część energii kinetycznej zderzenia. Powstały gluon ma dostatecznie dużo energii, aby następnie ulec rozpadowi na kwark wysoki i kwark antywysoki, których łączna masa jest ponad 185 razy większa od masy dwóch protonów sprzed zderzenia.

Kwark wysoki i kwark antywysoki są ciężkie. Tak bardzo ciężkie, że mogą wypluć bozon W bez uciekania się do zasady nieoznaczoności w celu pożyczenia energii. Kwark wysoki i kwark antywysoki rozpadają się na kwark niski i kwark antyniski w czasie około 10^{-25} sekundy, jednej milionowej części jednej miliardowej części z jednej miliardowej sekundy. Tak szybko, że nigdy bezpośrednio nie widzimy kwarka wysokiego. Tak szybko, że oddziaływanie silne nie ma żadnych szans na związanie kwarka wysokiego w hadronie. Po tych rozpadach ze zderzenia wyłaniają się obdarzony ładunkiem dodatnim bozon W, kwark niski, obdarzony ujemnym ładunkiem bozon W i kwark antyniski.

Oba bozony również momentalnie ulegają rozpadowi na jakąkolwiek parę cząstek – powiedzmy, że w wypadku pierwszego będą to mion i antyneutrino mionowe, a w wypadku drugiego jedna z wielu możliwych par kwarków, kwark powabny i kwark antyniski. To samo jądro zderzenia, ta jego część, którą można obliczyć,

posługując się prostym diagramem Feynmana, przedstawionym poniżej:



Podstawowy diagram Feynmana dla pierwszej fazy procesu powstawania w LHC kwarków wysokiego i antywysokiego, zanim sprawy zaczynają się komplikować

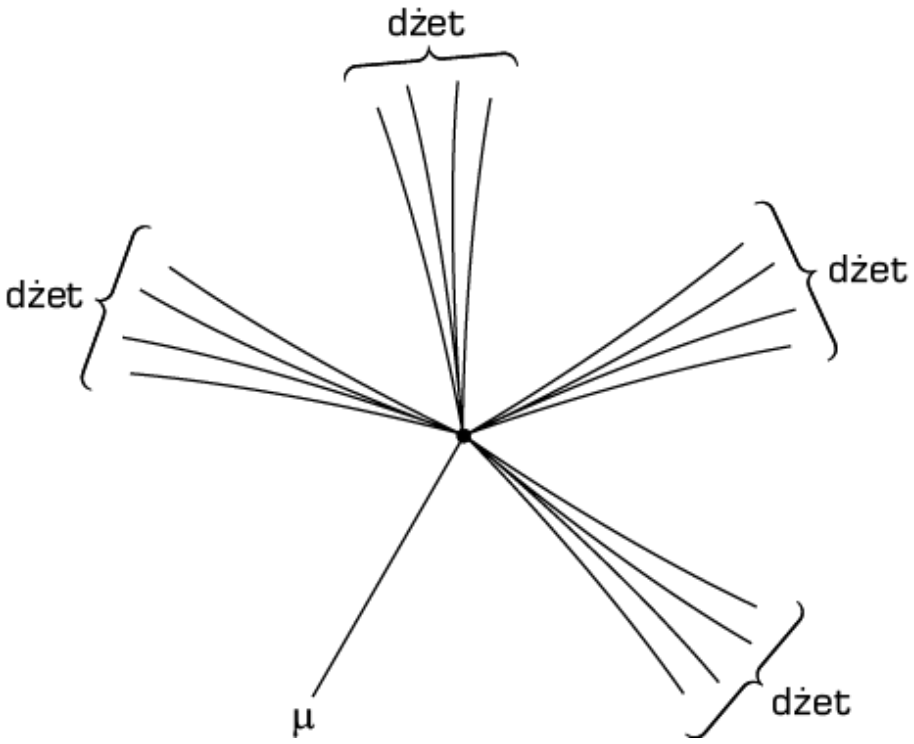
Mion i antyneutrino mionowe oddalają się z miejsca zderzenia, przenikają przez detektor i odlatują w świat. Mion ostatecznie ulegnie rozpadowi na neutrino mionowe, elektron i antyneutrino elektronowe, zapewne po przebyciu zaledwie kilku kilometrów.

Wśród kwarków natomiast górę bierze oddziaływanie silne. Zaczynają one emitować gluony, które rozciągają się w struny; część z nich później pęka, przyczyniając się do powstania większej liczby par kwark-antykwark. Na koniec wszystkie zostają związane w hadronach przez proces, który nazywa się hadronizacją. Mieliśmy cztery kwarki (niski, antyniski, powabny i antydziwny), na koniec więc uzyskamy cztery dżety hadronów.

Ciężkie kwarki również ulegają rozpadowi. Na przykład kwark niski może zostać związany razem z kwarkiem antygórnym w hadronie znanym jako B^-. Kwark niski po wyemitowaniu bozonu W rozpada się na kwark powabny, gdy hadronowi uda się przebyć odległość kilku milimetrów – wystarczającą, aby dokonać pomiaru. Wyemitowany bozon W ulega rozpadowi, w którym powstaje jeszcze więcej kwarków albo kolejna para: mion i antyneutrino mionowe. Powstaje jeszcze więcej hadronów.

To samo dzieje się z hadronami zawierającymi kwark powabny: emituje on bozon W i ulega rozpadowi, którego produktem jest kwark dziwny. Ostatecznie zostają tylko hadrony, które są albo stabilne, albo żyją dostatecznie długo, aby pokonać w naszym detektorze odległość kilku metrów. Są to pion, kaon, proton i neutron. Mogą być jeszcze powstałe przy okazji elektrony i fotony. One również są stabilne i można je mierzyć.

Takie są ostateczne pozostałości po zderzeniu dwóch protonów. Zderzenie prowadzi do ich całkowitego zniszczenia, a kwarki i gluony rozlatują się we wszystkie strony świata. Ze szczątków powstaje jeszcze więcej hadronów, które w większości poruszają się dalej w kierunku zbliżonym do kierunku pierwotnego promienia. Tak więc pełny obraz zderzenia wygląda jak jedno wielkie pobojowisko:



Część cząstek oddala się z miejsca zderzenia, podążając za ulegającymi rozpadowi kwarkami wysokim i antywysokim.

Z całego tego bałaganu możemy wybrać mion i cztery dżety, aby przeprowadzić rekonstrukcję kwarków wysokich, z których elementy te powstały. To zaledwie drobny fragment tego, co może wydarzyć się w takim zderzeniu, ale ponieważ na końcu zostaje tylko kilka rodzajów cząstek, które żyją dostatecznie długo, abyśmy mogli je zarejestrować, sporo zderzeń wygląda bardzo podobnie, mimo że wiele radykalnych różnic zostaje niezauważonych. Ponieważ zderzamy protony, najpowszechniejszym widokiem są dżety hadronów. Dużym wyzwaniem jest doszukanie się, czy obserwowane efekty zderzenia pochodzą od dwóch zderzających się protonów, czy może źródłem jest coś bardziej interesującego, na przykład rozpad kwarka wysokiego. Ten rodzaj pracy detektywistycznej w świecie cząstek jest jednym z najprzyjemniejszych aspektów uczestniczenia w eksperymentach prowadzonych w LHC lub jakimkolwiek innym ośrodku badań z zakresu fizyki cząstek. Opowiem o tym więcej w rozdziale 7.

Ukryte oddziaływania

Oddziaływania silne i słabe podsuwają również pomysły na temat tego, co ewentualnie może znajdować się poza obszarem obowiązywania Modelu Standardowego. Jeżeli we Wszechświecie występują jeszcze inne oddziaływania – a niemal na pewno tak jest – to musi istnieć powód tego, że dotąd pory ich nie zaobserwowaliśmy. Takie nowe oddziaływanie może mieć ograniczony zasięg, podobnie jak w QCD: kwarki, leptony lub bozony mogą być w rzeczywistości złożone z jakichś jeszcze mniejszych elementów, spajanych przez te ukryte oddziaływania. Gdybyśmy byli w stanie zderzać cząstki z odpowiednio dużą siłą, może zdołalibyśmy pokonać to oddziaływanie i doprowadzić do rozbicia tych cząstek. Na przykład rozbić bozon W. Możliwe też, że z nowym oddziaływaniem związany jest ciężki bozon, dużo cięższy od bozonu W lub jakiejkolwiek znanej nam obecnie cząstki. Odwołując się do zasady nieoznaczoności, moglibyśmy podjąć próbę wykrycia tego nowego bozonu w pewnych rzadkich procesach, tak jak w rozpadzie beta, który wskazywał na istnienie bozonu W. Jeżeli zaś włożylibyśmy w zderzenie odpowiednio dużo energii, może udałoby nam się bezpośrednio wytworzyć ten nowy bozon. Tak właśnie stało się z bozonem W, który wytworzono w CERN w 1986 roku, gdy akceleratory cząstek wreszcie osiągnęły wymaganą moc. Kiedy w zderzenie włoży się dostatecznie dużo energii, do wytworzenia bozonu W nie jest już potrzebna zasada nieoznaczoności. Oddziaływania słabe obserwowane są coraz powszechniej, a w detektorach rejestrowane są licznie takie produkty zderzeń, jak miony i antyneutrina mionowe, elektrony i antyneutrina elektronowe.

Zanim jednak udamy się na tereny nieobjęte Modelem Standardowym, trzeba wyjaśnić do końca kilka spraw. Wszystkie oddziaływania mają coś wspólnego, coś głębszego, w co zaangażowany jest ostatni brakujący fragment obrazu: bozon Higgsa.

ROZDZIAŁ 6

BOZON HIGGSA

Model Standardowy działa zachwycająco dobrze. Opisuje świat wokół nas w kategoriach maleńkich cząstek i ich oddziaływań. Opisuje również wszystko, co wyłania się z wysokoenergetycznych zderzeń w Wielkim Zderzaczu Hadronów, co znaczy, że opisuje niemal wszystko, co mogło się wydarzyć w naszym Wszechświecie, poczynając od ułamka sekundy po Wielkim Wybuchu. Dokonuje tego, posługując się kilkoma różnymi teoriami. Elektrodynamika kwantowa (QED) opisuje oddziaływanie elektromagnetyczne i fotony, chromodynamika kwantowa (QCD) zaś – oddziaływanie silne i glony. Oddziaływanie słabe przenoszone jest przez bozony W i wyjaśnia mechanizm rozpadu cząstek. Równanie Diraca tłumaczy, w jaki sposób poruszają się cząstki materii, fermiony.

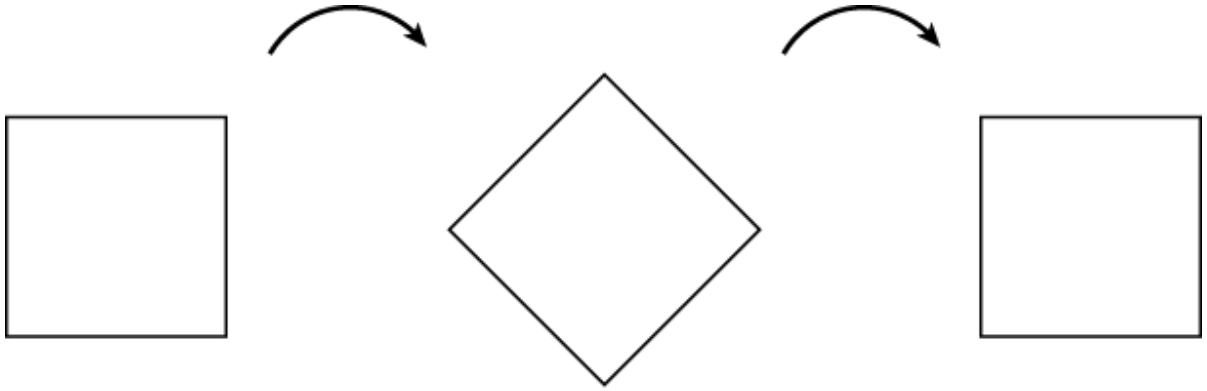
Co jest najbardziej ekscytujące, to fakt, że wszystkie te części są z sobą powiązane. Istnieje coś znacznie głębszego, zasada przewodnia, wykraczająca poza Model Standardowy, rządząca tym, co być może kryje się za nim: symetria. Zastosowanie symetrii do naszego pojmowania świata subatomowego pokazało również, że czegoś brakuje, i doprowadziło do najdłuższego polowania na cząstkę w historii nauki: poszukiwania bozonu Higgsa.

Symetria

Symetria jest prawdopodobnie jedną z najważniejszych idei, jakie pojawiły się w fizyce od początku XX wieku. Stanowi ogniwo łączące

teorię względności Einsteina z Modelem Standardowym fizyki cząstek, dwie wielkie teorie współczesnej fizyki, i może okazać się elementem o największym znaczeniu w kształtowaniu całego Wszechświata.

Kiedy mówimy o symetrii, może nam się nasuwać obraz czegoś, co wygląda tak samo jak własne odbicie w lustrze. Podobno ludzie o symetrycznych twarzach wydają się atrakcyjniejsi. Jeżeli przetniemy coś na pół, obydwie połówki mogą być do siebie symetryczne, o symetrii powiemy również wtedy, gdy coś nie zmienia swojego wyglądu w wyniku obrotu. Na przykład kwadrat ma mnóstwo symetrii – można dokonać jego różnych przekształceń i po każdym z nich będzie wyglądał tak samo: odbić go w lustrze, obrócić o 90 stopni, 180 stopni lub 270 stopni. Koło jest jeszcze bardziej symetryczne: obróćcie je o dowolny kąt, a jego wygląd się nie zmieni.



Symetrie kwadratu: obróćcie go o 90 stopni, a jego wygląd nie ulegnie zmianie.

Można to wyrazić w sposób bardziej matematyczny: symetria oznacza, że coś nie zmienia się w wyniku przekształcenia. Owo „coś” może być dosłownie czymkolwiek, czyjąś twarzą, kwadratem lub cząstką subatomową. Podobnie „przekształcenie” może oznaczać dowolną czynność, odbicie w lustrze, obrót o 90 stopni, zmianę ładunku kolorowego w oddziaływaniu silnym... naprawdę, cokolwiek.

Jeżeli spojrzymy na równania fizyczne, które opisują świat, przekonamy się, że są w nich ukryte symetrie, co wiele nam mówi o Wszechświecie na jego najgłębszym poziomie. Przede wszystkim istnieją symetrie w przestrzeni. W fizyce „przestrzeń" oznacza w rzeczywistości położenie: uderzenie piłki golfowej zmienia jej pozycję w przestrzeni. I niezależnie od tego, w jaki sposób uderzymy piłkę, opisujące jej ruch prawa fizyki na każdym polu golfowym we Wszechświecie pozostaną takie same. To właśnie jest symetria, prawa fizyki są niezależne od położenia, od transformacji w przestrzeni. Oczywiście, istnieją różnice, na przykład każde pole ma bunkry w innych miejscach. Jednak leżące u podstaw równania prawa fizyki się nie zmieniają. W poszczególnych miejscach zmieniają się tylko liczby, które do nich wstawiamy – takie jak liczba znajdujących się na danym polu bunkrów. Jest również symetria względem kierunku upływu czasu, zgodnie z którą równania opisujące ruch piłki są takie same dzisiaj, jakie były wczoraj. I znowu to, że pewnego dnia mógł padać deszcz, a następnego już nie, nie oznacza wcale, iż zmieniła się struktura samych równań – zmieniły się tylko wstawiane do nich liczby.

Symetrie przestrzeni i czasu można zebrać w tak zwaną grupę Poincarégo, która stanowi podwaliny teorii względności Einsteina. Zasadniczo relatywistyka mówi nam, że przestrzeń wszędzie wygląda tak samo, i chociaż stwierdzenie takie może wydawać się oczywiste, wynika ono z istnienia wspomnianych symetrii. Niemniej jednak symetrie mogą prowadzić również do wszelkiego rodzaju konkluzji sprzecznych z intuicją, takich jak równoważność masy i energii: $E = mc^2$. W ogólnej teorii względności Einstein rozszerzył te idee na grawitację i ruch przyspieszony, ponownie kierując się symetriami. I choć uczony ten pierwszy rozpoznał rolę symetrii w fizyce, okazuje się, że ma ona zasadnicze znaczenie również w świecie cząstek elementarnych, co lokuje ją w kręgu naszych zainteresowań w tej książce. Symetrie w fizyce cząstek mają związek z dziwnymi właściwościami kwantowymi, wobec czego są dość abstrakcyjne, ale ujawniają prawdziwą strukturę Modelu Standardowego. Nurkujemy teraz w głębokiej wodzie, zatem zaczerpnijcie powietrza!

O cząstkach i strefach czasowych

Chcąc zrozumieć pierwszą symetrię, musimy cofnąć się do pewnych idei omawianych w rozdziale 2, w szczególności do informacji o tym, jak poruszają się cząstki: rozszczepiają się na wiele widmowych kopii i pokonują wszystkie możliwe trajektorie z A do B. W moim przykładzie z kwantową drogą do pracy wsiadam do autobusu, który następnie rozszczepia się na wiele różnych kopii, rozjeżdżających się na wszystkie strony i przemierzających miasto każdą możliwą trasą, a kiedy dotrę do pracy, wszystkie ponownie łączą się w jeden autobus. Niektóre z tych dróg mogą wzajemnie się znosić, jak wtedy, gdy w wąskiej uliczce naprzeciw siebie spotkają się dwa autobusy, blokując sobie ruch. Kiedy wszystko dzieje się naraz, nie wszystkie trajektorie są możliwe.

Żeby dwa autobusy zablokowały się w wąskiej uliczce, musi zdarzyć się coś jeszcze, obydwa muszą znaleźć się tam w tym samym czasie. Gdyby wjechały w uliczkę o różnych porach, każdy z nich pokonałby ją bez problemu. Cząstki muszą w jakiś sposób śledzić upływ czasu i dokonują tego za pomocą czegoś w rodzaju „wewnętrznego zegara", w matematyce zwanego *fazą zespoloną*. Działa podobnie do krokomierza, zegara z jedną wskazówką, która obraca się wraz z ruchem cząstki. Im dalej cząstka wędruje, tym więcej obrotów wykonuje wskazówka. Na początku podróży, zanim wszystkie kopie cząstki wyruszą w swoje trasy, dokonują wyzerowania swoich krokomierzy, tak że wskazówka każdego z nich celuje w tym samym kierunku. Następnie wszystkie kopie ruszają różnymi trasami, z których jedne są dłuższe niż inne, w związku z czym ich krokomierze tracą i odzyskują synchronizację. Kiedy jakieś dwie trasy zetkną się z sobą, o tym, co się zdarzy, zadecyduje względna synchronizacja krokomierzy. Jeżeli wskazówki są ustawione w tym samym kierunku, krokomierze są „zsynchronizowane" i nie ma problemu. Jeżeli położenie wskazówek różni się o 180 stopni, mamy sytuację odpowiadającą spotkaniu czołowemu i obydwie trajektorie wzajemnie się zablokują. Pomiędzy tymi skrajnościami znajdują się trasy częściowo zablokowane lub częściowo się znoszące, które

nadal do pewnego stopnia mogą wpływać na to, jak porusza się cząstka.

Różne trajektorie cząstek, które mogą okazać się niezsynchronizowane (po lewej) lub zsynchronizowane (po prawej)

Teraz symetria: zachowanie cząstki jest niezależne od tego, jak wyglądały ustawienia jej krokomierza przed rozpoczęciem ruchu. Ważne jest to, że przed startem ustawienia krokomierzy wszystkich dziwacznych kwantowych kopii cząstki muszą być zsynchronizowane. Nie ma znaczenia, czy ich wskazówki wskazują 12, 15, czy jakąkolwiek inną godzinę – liczy się tylko to, że przed startem wszystkie celują w tym samym kierunku, a cząstki poruszające się po swoich trajektoriach to gubią, to odzyskują synchronizację. Jedną z konsekwencji tej symetrii jest fakt, że nigdy nie możemy zmierzyć absolutnych ustawień krokomierza jakiejkolwiek cząstki. W pewnym sensie wydaje się to racjonalne: skoro ustawienia absolutne są bez znaczenia, nie możemy ich nawet poznać! Jedyne, co się liczy, to względna synchronizacja wzdłuż różnych trajektorii, a to możemy wyczytać ze sposobu, w jaki cząstka się porusza, albo z tego, które trajektorie zostają zablokowane.

Odnosi się to do jednej cząstki i jej kwantowych kopii. Teraz zobaczmy, co się dzieje, kiedy są dwie różne cząstki, które spotykają się i wchodzą z sobą w interakcję, jak dwa protony zderzające się w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Obydwa niosą wewnętrzne zegary, z tym że, podobnie jak w wypadku jednej cząstki obierającej wiele trajektorii, tym, co się naprawdę liczy, jest ich względna synchronizacja. A zatem co teraz dzieje się z naszą symetrią? Czy na początku swojej podróży obydwie cząstki nadal mają swobodę

wyboru ustawień krokomierza? Z jednej strony symetria musi zachodzić, ponieważ nie możemy wiedzieć, jak każda cząstka ustawiła swój krokomierz. Z drugiej strony nie może zachodzić, ponieważ gdyby każda cząstka ustawiła swój krokomierz inaczej, to zmieniłoby ich względną synchronizację, co znaczy, że zachowywałyby się inaczej: teraz mogłyby w ogóle z sobą nie oddziaływać. Czegoś tutaj brakuje.

Życie codzienne dostarcza pewnej analogii, która mogłaby być pomocna i która przy tej okazji wciąż mi się nasuwa: strefy czasowe. Mieszkam w Wielkiej Brytanii, lecz wielu moich kolegów pracuje w CERN, gdzie obowiązuje czas środkowoeuropejski, o jedną godzinę do przodu względem Wielkiej Brytanii. Niektórzy pracują w Kalifornii, osiem godzin wstecz względem Wielkiej Brytanii. Spotkania są zwykle wyznaczane według czasu obowiązującego w CERN, a wielu takich badaczy jak ja bierze w nich udział za pośrednictwem wideokonferencji, łącząc się z miejsc rozsianych po całym świecie. Jeżeli zebranie jest wyznaczone na godzinę 14 czasu CERN, ja muszę połączyć się o 13 czasu obowiązującego w Londynie. Koledzy z Kalifornii muszą połączyć się o 5 rano. Chodzi o to, że wszyscy mamy inną etykietę dla tego samego czasu: 13 w Wielkiej Brytanii jest tą samą godziną co 14 w CERN i 5 rano w Kalifornii. Nasze indywidualne zegary są niezsynchronizowane, tak jak indywidualne krokomierze cząstek, ale my wciąż potrafimy połączyć się z innymi o odpowiednim czasie.

Właściwie nie ma jednoznacznej definicji godziny 14. To tylko etykietka, która zmienia się w zależności od kraju, a nawet od pory roku. Niektóre kraje po zimie przestawiają zegary o godzinę, przechodząc na czas letni, a data tego przesunięcia również jest inna w zależności od miejsca! To samo dotyczy cząstek: wszystkie mają swoje wewnętrzne krokomierze, ale nie ma jednoznacznej definicji, jak powinny być zsynchronizowane. Mój zegar wskazuje inną godzinę niż zegar kolegów w CERN czy w Kalifornii. Podobnie nie ma powodu, żeby wewnętrzny krokomierz danej cząstki musiał być zsynchronizowany z cząstką na drugim krańcu Wszechświata, czy na innym krańcu świata, a nawet z rozpędzaną w przeciwnym kierunku cząstką w LHC.

Kluczem do rozwiązania problemu jest komunikacja. Na przykład mogę wysłać e-maila z propozycją „Spotkajmy się za godzinę!” lub „Spotkajmy się o 14 czasu CERN!”, i wszyscy dokładnie zrozumiemy, co to znaczy, ponieważ wszyscy wiemy, jak przełożyć to na swój czas lokalny. Tak więc żeby uniknąć problemu różnych cząstek z różnymi ustawieniami krokomierzy, musi istnieć jakiś sposób komunikacji między nimi, dzięki któremu ustalą swoją względną synchronizację.

I jest. Wygląda niemal jak magia. Można wziąć równanie Diraca z rozdziału 2, opisujące ruch dowolnego fermionu, na przykład elektronu, i zastosować symetrię: wynik nie może zależeć od ustawień wewnętrznego krokomierza tego fermionu. Po to, żeby symetria była prawdziwa, żeby równanie dawało te same odpowiedzi, trzeba dodać coś ekstra. Ten dodatkowy element opisuje interakcję, sposób, w jaki cząstki komunikują się z sobą, ustalając swoją względną synchronizację. Ta interakcja to w gruncie rzeczy oddziaływanie elektromagnetyczne, a cząstki komunikują się z sobą, wymieniając fotony, bozony będące nośnikami tego oddziaływania. Oddziaływanie elektromagnetyczne jest bezpośrednim wynikiem zachodzącej we Wszechświecie znacznie głębszej symetrii. Oto jak po zastosowaniu symetrii wygląda równanie Diraca:

$$i\gamma\partial\psi = m\psi + A\psi$$

Zastosowana tutaj notacja może wprowadzać pewne zamieszanie, jako że γ w równaniu Diraca odnosi się do ruchu cząstki. W diagramach Feynmana γ symbolizuje foton, lecz w równaniu Diraca oznaczono go symbolem A. Tak więc nowy człon równania zawiera zarówno cząstkę, ψ, jak też foton, A, i jest matematyczną wersją wierzchołka w kwantowoelektrodynamicznych diagramach Feynmana.

Jest jeszcze jedna konsekwencja. Nowy składnik, który pojawia się w równaniu Diraca, nie zawiera masy fotonu. Dodanie masy ponownie zburzyłoby równowagę i złamało symetrię. Zatem symetria nie tylko mówi nam, że oddziaływanie elektromagnetyczne musi

istnieć, ale również to, że foton nie może mieć masy. Wszystkie pozbawione masy cząstki we Wszechświecie poruszają się z prędkością równą naturalnej wartości granicznej, wartości, którą znamy jako prędkość światła, ponieważ jest to prędkość, z jaką poruszają się pozbawione masy fotony!

Cząstki w całym Wszechświecie mają więc różne lokalne synchronizacje swoich krokomierzy, przy czym te synchronizacje mogą zmieniać się w zależności od czasu i miejsca. Oddziaływanie elektromagnetyczne istnieje po to, żeby to wszystko wygładzić, a cząstki komunikują swoje lokalne ustawienia i pozostają zsynchronizowane dzięki wymianie fotonów, bozonów będących nośnikami tego oddziaływania. Podobnie badacze współpracujący w Wielkim Zderzaczu Hadronów są rozrzuceni po całym świecie, a ustawienia ich lokalnych zegarów różnią się w zależności od miejsca i pory roku. Sieć WWW została wynaleziona w CERN po to, by umożliwić wszystkim komunikację, a my pozostajemy zsynchronizowani dzięki wymienianiu e-maili, „bozonów" sieci, oddziaływania, dzięki któremu możliwa jest międzynarodowa współpraca.

Niedoceniana bohaterka fizyki

Symetrie pojawiają się w całej fizyce. Jak dotąd wspomniałem, że Wszechświat ma symetrie przestrzeni i czasu, które dały początek ogólnej teorii względności Einsteina. Z kolei w świecie kwantowym cząstki zachowują się tak samo niezależnie od ustawień swoich wewnętrznych krokomierzy, z czego wynika, że musi istnieć oddziaływanie elektromagnetyczne, które umożliwia cząstkom wypracowanie względnej synchronizacji i zachowanie tej symetrii.

Wspomniane symetrie mają też inne implikacje, płynące z jednego z najważniejszych osiągnięć matematycznych we współczesnej fizyce: twierdzenia Noether. Jako kobieta pracująca w środowisku akademickim na początku XX wieku Emmy Noether spotkała się z instytucjonalnym seksizmem. W latach trzydziestych faszystowskie

czystki sprawiły, że będąc Żydówką pracującą w Niemczech, musiała opuścić ten kraj i udać się do Ameryki, zaledwie dwa lata przed swoją przedwczesną śmiercią. Einstein nazwał ją w nekrologu „znaczącym, kreatywnym geniuszem matematycznym", głównie z uwagi na jej pracę z 1915 roku, w której udowodniła, że tam, gdzie zachodzi symetria, zachodzi jakieś prawo zachowania: coś musi pozostawać stałe.

Twierdzenie Noether można zastosować do wszystkich symetrii w fizyce. Fakt, że przestrzeń wszędzie wygląda tak samo, prowadzi do zasady zachowania pędu, a fakt, że Wszechświat wygląda tak samo w czasie, prowadzi do zasady zachowania energii. Fakt, że prawa fizyki się nie zmieniają, oznacza, iż wahadło zegara cały czas pozostaje w ruchu. Tarcie i opór powietrza dążą do złamania tej symetrii i spowolnienia poruszających się ciał, dlatego właśnie łatwiej wykonać obliczenia dla krów, które nie podlegają tarciu i znajdują się w próżni, jak to zrobił profesor fizyki w rozdziale 4. Natomiast dwie elementarne zasady fizyczne – zasada zachowania energii i zasada zachowania pędu – wynikają bezpośrednio z leżących u podstaw wszystkiego symetrii czasu i przestrzeni.

Tu jednak interesują nas symetrie kwantowe: fakt, że Wszechświat zachowuje się tak samo niezależnie od tego, jak ustawione są wewnętrzne zegary cząstek. Na mocy twierdzenia Noether ta symetria również prowadzi do zasady zachowania pewnej wielkości. Ową wielkością jest ładunek elektryczny, własność, która pozwala cząstkom oddziaływać z fotonami, głównymi odpowiedzialnymi za zachowanie symetrii. A zatem symetria nie tylko przewiduje istnienie oddziaływania elektromagnetycznego oraz pozbawionych masy fotonów, lecz także oznacza, że zachodzi zasada zachowania ładunku elektrycznego: całkowita ilość ładunku elektrycznego we Wszechświecie nie ulega zmianom. Widzimy to w diagramach Feynmana, gdzie pozbawiony ładunku foton może zamienić się w ujemny elektron i dodatni antyelektron, nie zmieniając podczas oddziaływania całkowitej ilości ładunku elektrycznego, która w tym wypadku pozostaje równa zeru.

Nawigacja satelitarna i rzuty monetą

Symetrie można zastosować do wszystkich innych oddziaływań w Modelu Standardowym. W rozdziale 4 opisałem oddziaływanie silne i związany z nim ładunek kolorowy. Ładunek ten jest „trójwymiarowy” – ładunek elektryczny to tylko liczba, podczas gdy ładunek kolorowy to liczba i kierunek. Kierunki te oznaczono jako „czerwony”, „zielony” i „niebieski”, a ładunek kolorowy przypomina wiatrowskaz, który może ustawić się wzdłuż któregokolwiek z nich.

Jednak tak jak nie ma uniwersalnej synchronizacji wewnętrznych krokomierzy cząstek, nie ma też uniwersalnej definicji, który kierunek jest czerwony, niebieski, a który zielony. Kierunki są względne, a przy tym definicja, który jest czerwony, może zmieniać się w zależności od czasu i miejsca. Na przykład dając komuś wskazówki, którędy jechać, możecie powiedzieć, że po prawej będzie mijał sklep – lecz w istocie wszystko zależy od tego, w którą stronę będzie jechał. W drodze powrotnej będzie mijał sklep po lewej stronie. Kierunki nie są uniwersalne, ale zależne od tego, jak się ustawimy. To samo dotyczy etykiet ładunku kolorowego – kierunek, który dla jednego kwarka będzie czerwony, dla innego może być niebieski.

I podobnie jak wewnętrzny krokomierz cząstki, ładunek kolorowy kwarków zawsze pozostaje przed nami ukryty. Nie ma sposobu, żeby się dowiedzieć, czy dany kwark jest czerwony, niebieski czy zielony. A to dlatego, że absolutna definicja tych kierunków nie ma znaczenia. Zachodzi tutaj symetria, zachowanie kwarka nie może zależeć od tego, który kierunek nazwiemy czerwonym, niebieskim czy zielonym. Tym, co ma dla kwarków znaczenie, jest ich względny kolor. Żeby z kwarka i antykwarka powstał hadron, muszą mieć przeciwne kolory. Możemy je nazwać czerwony i antyczerwony, ale nazwa może być dowolna. Równie dobrze możemy uznać je za niebieski i antyniebieski, a zachowanie hadronu pozostanie bez zmian. A skoro nazwa koloru jest dowolna i może zmieniać się w zależności od miejsca i czasu, kwarki muszą mieć jakieś sposoby komunikacji, żeby ustalić swoje względne kolory.

Zatem ponownie, żeby zachodziła symetria, musi pojawić się jakaś siła, coś w rodzaju nawigacji satelitarnej dla kierunków kolorowych, a tym, co ją zapewnia, jest oddziaływanie silne. Jego nośnikiem jest bozon, który przenosi między kwarkami informację o kolorach – mianowicie gluon. Podobnie jak w odniesieniu do fotonu, symetria wymaga, żeby gluon był bezmasowy, a na mocy twierdzenia Noether zachodzi zasada zachowania: całkowita ilość ładunku kolorowego musi być stała.

Wreszcie oddziaływanie słabe: pomysł jest ten sam, tyle że tym razem mamy dwa „wymiary" zamiast trzech. W rozdziale 5 pisałem o tym, że cząstki występują parami, niczym dwie strony monety, orzeł i reszka. Przy czym stosuje się do nich ta sama logika co wcześniej: nie ma uniwersalnej, absolutnej definicji tego, czym jest „orzeł" – liczy się jedynie względny stan obu cząstek. Niezależnie od tego, jak zdefiniujemy „orła" i „reszkę", Wszechświat powinien pozostać niezmieniony, a żeby zapewnić mu tę symetrię, musimy wprowadzić nową siłę i nowy bozon, bozon W. Wraz z tą symetrią zachodzi nowa zasada zachowania, dotycząca ładunku oddziaływań słabych. I tu pojawiają się pierwsze oznaki problemu. Nie potrafimy zobaczyć wewnętrznego krokomierza cząstki ani ustawienia kolorowego wiatrowskazu kwarka. Jednak różnice między orłami i reszkami oddziaływania słabego są oczywiste: elektron jest zupełnie inny niż neutrino. Z jakiegoś powodu ta symetria nie jest przed nami ukryta.

Algebra torów kolejowych

Symetrie stojące za Modelem Standardowym wiążą się z określeniami, które nie mają znaczenia absolutnego, oraz definicjami, które mogą zmieniać się w zależności od miejsca i czasu, tak jak ustawienia wewnętrznego krokomierza cząstek, kierunek wiatrowskazu pokazującego ładunek kolorowy, czy ustalenie, którą stronę monety nazwiemy orłem, a którą reszką w oddziaływaniu słabym. Tego rodzaju symetrie określane są mianem symetrii

cechowania, z angielskiego *gauge symmmetries*, gdzie słowo *gauge* ma swoje źródło w terminie stosowanym na określenie rozstawu torów kolejowych (odległości między dwiema równoległymi szynami). Rozstaw szyn może być dowolny, a tory kolejowe nadal pozostaną torami. Niemniej jednak kupując pociągi, najlepiej jest poinformować, jakiego rozstawu szyn używacie, w przeciwnym wypadku nic nie będzie działało! Stąd bozony, które komunikują informacje związane z siłami symetrii cechowania, fotony, gluony i bozony W, znane są jako „bozony cechowania".

Istnieje cała gałąź matematyki poświęcona badaniu symetrii. Czasem Model Standardowy zapisywany jest za pomocą używanej w tej dziedzinie notacji matematycznej jako „U(1) × SU(2) × SU(3)" – jeżeli chcielibyście dowiedzieć się nieco więcej na temat tego zapisu, na końcu znajdziecie poświęcony mu krótki dodatek. Co najistotniejsze, to fakt, że matematyka ujawniła kolejny problem. Powinny być trzy rodzaje bozonów W: jeden przenoszący dodatni ładunek elektryczny, jeden przenoszący ujemny ładunek elektryczny i jeden nieprzenoszący żadnego ładunku elektrycznego. Tymczasem w naturze obserwujemy tylko bozony o dodatnim i ujemnym ładunku elektrycznym, neutralnego brakuje.

Mamy więc teraz trzy problemy. Po pierwsze, w przeciwieństwie do stanu ładunku kolorowego i wewnętrznego krokomierza cząstek stan ładunku słabego nie jest przed nami ukryty. Po drugie, najwyraźniej brakuje nam bozonu: powinien być trzeci bozon W, pozbawiony ładunku elektrycznego. I wreszcie istnienie symetrii wymaga, żeby bozony były pozbawione masy, co jest prawdą w odniesieniu do fotonu i gluonu, ale bozony W, które obserwujemy w naturze, są ekstremalnie ciężkie – ponad 85 razy cięższe od protonu. Wydaje się, że w oddziaływaniu słabym kryje się jakaś różnica i na tym etapie albo musimy odrzucić całą ideę symetrii i zacząć wszystko od nowa, albo znaleźć sposób na to, żeby wszystko zagrało.

Nadanie problemowi wagi

Pierwsza wskazówka do rozwiązania problemów z oddziaływaniem słabym pojawiła się w 1964 roku: furtka, która pozwalała bozonom cechowania mieć masę. To jedna z tych sytuacji, gdy kilka osób dokonuje odkrycia jednocześnie. Narzędzia matematyczne były gotowe, wyniki doświadczeń wytyczały właściwy kierunek, toteż kilka osób niezależnie od siebie dokonało tego samego skoku wyobraźni. Pierwsi w sierpniu 1964 roku przedstawili swój pomysł Robert Brout i François Englert, parę miesięcy później zrobił to Peter Higgs, a po kolejnych kilku miesiącach Gerald Guralnik, Carl Hagen i Tom Kibble (wszyscy zainspirowani wcześniejszą publikacją Philipa Andersona i niezależną, późniejszą pracą Gerardusa 't Hoofta oraz jeszcze większą pulą prac innych osób pracujących nad podobnymi pomysłami). Furtka, którą wszyscy znaleźli, czasem nazywana jest mechanizmem BEH (Brout, Englert i Higgs), od nazwisk naukowców, których komisja noblowska w 2013 roku wytypowała do Nagrody Nobla, aczkolwiek tak się nieszczęśliwie złożyło, że Robert Brout wcześniej zmarł. Sam Peter Higgs określa go mianem mechanizmu ABEGHHK'tH (Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble i 't Hooft)! Ja posłużę się nazwą, która szczęśliwie jest najczęściej stosowana: mechanizm Higgsa.

Furtka pozwalająca nadać masę bozonom cechowania wymaga zupełnie nowej siły natury, niepodobnej do żadnej z poznanych przez nas do tej pory. Podczas gdy inne siły są rezultatem symetrii cechowania, ta łamie ową symetrię. Mechanizm Higgsa mówi, że istnieje pole siły, rozciągające się w całym Wszechświecie, pole Higgsa, i że jest ono pełne energii. Aby sobie uświadomić, na czym polega różnica, możemy porównać je z innym polem siły, takim jak grawitacja. Grawitacja działa tylko wtedy, gdy w pobliżu znajduje się masa – teraz czujemy przyciąganie Ziemi, lecz gdybyśmy oddalili się gdzieś daleko, gdzie nie ma gwiazd ani planet, przyciąganie grawitacyjne zniknęłoby. W pustej przestrzeni grawitacja jest „wyłączona". Tymczasem pole Higgsa zawsze jest „włączone", nawet w pustej przestrzeni, gdzie nie ma zupełnie nic. Zawsze zawiera ono energię, a cząstki mogą z niej korzystać. Nie jest to idealna analogia, lecz można sobie wyobrazić, że pole Higgsa wypełnia pustą przestrzeń niczym melasa. Spróbujcie zamieszać melasę w misce,

a przekonacie się, że bardzo trudno poruszać łyżką, jakby była bardzo ciężka. I właśnie to oddziaływanie z polem Higgsa, to lepienie się, sprawia, że wydaje się, iż cząstki mają masę. Ta analogia nie jest doskonała, ponieważ coś, co porusza się w melasie, będzie zwalniało i w końcu się zatrzyma. Tymczasem cząstka poruszająca się w polu Higgsa nabierze masy, ale będzie kontynuowała swój ruch. Pole Higgsa nie jest tym samym co dawna idea eteru, ponieważ nie ma uprzywilejowanego kierunku i w rzeczywistości nigdzie nie znajduje się „w spoczynku". To po prostu stały zapas energii.

Jeżeli pole Higgsa istnieje, można sprawić, by oddziaływanie słabe działało jak symetria cechowania. Bozon W jest bozonem cechowania i jest z natury bezmasowy. Jednak na którymś etapie wczesnego Wszechświata pole Higgsa „włączyło się" i złamało symetrię cechowania w oddziaływaniach słabych. Drogą interakcji czy też „lepienia" się do pola Higgsa bozon W zyskuje pewną masę. To właśnie jest ta furtka: masa bozonu W nie jest cechą samego bozonu – czego nie dopuszcza symetria – lecz wynikiem oddziaływania bozonu W z polem Higgsa. Ponieważ symetria cechowania w oddziaływaniach słabych została złamana, złamaniu uległa również symetria między różnymi stanami ładunku słabego, wobec czego możemy na przykład określić różnicę między elektronem a neutrinem. To jak oglądanie odbicia w pękniętym lustrze – łatwo wskazać miejsca, w których zostaje złamana symetria.

Ostatnim elementem układanki był przewidywany przez teorię cechowania dla oddziaływania słabego brakujący neutralny bozon W. Rozgryzienie tego, gdzie się podział, wymagało wprowadzenia kolejnej zmiany w naszym wyobrażeniu o tym, czym w istocie jest elektromagnetyzm, i rozwinięcia nowej teorii, modelu elektrosłabego.

Przezwojenie elektromagnetyzmu

Po wzmożonej fali publikacji na temat mechanizmu Higgsa, jaka przetoczyła się w 1964 roku, idea nadania bozonom cechowania

masy mogła pozostać raczej ciekawostką matematyczną niż zjawiskiem faktycznie funkcjonującym w naturze. Jednak w 1968 roku Abdus Salam i Steven Weinberg zrozumieli, że mechanizm Higgsa można połączyć z wcześniejszą teorią, opracowaną przez Sheldona Glashowa, co da w efekcie strukturę, którą widzimy w Modelu Standardowym.

Wcześniej w tym rozdziale wprowadziłem ideę symetrii cechowania, która wynika z podstawowych własności Wszechświata: nie istnieje wspólna synchronizacja dla wszystkich cząstek, nie ma jednoznacznej definicji kierunków ładunku kolorowego i tak dalej. Wydaje się, że oddziaływanie elektromagnetyczne respektuje symetrię cechowania, związaną z nawijaniem wewnętrznego krokomierza cząstki w przód i w tył. I chociaż ta symetria istnieje we Wszechświecie, okazuje się, że nie jest właśnie tym, co postrzegamy jako oddziaływanie elektromagnetyczne.

W rzeczywistości symetria nawijania wytwarza oddziaływanie, które jest podobne do elektromagnetyzmu i jest przenoszone przez bozon B. B jak Bozon. To cząstka, która swoim zachowaniem przypomina foton i jest stowarzyszona z ładunkiem podobnym do ładunku elektrycznego, ale nie jest taka sama. Istnieje pewna subtelna różnica: mogło nam się wydawać, że cząstka wykorzystuje krokomierz zasilany energią słoneczną, a w rzeczywistości to zwykłe baterie. Wyniki wyglądają identycznie, choć u podstaw kryje się różnica.

Ktoś może dojść do wniosku, że to niepotrzebna komplikacja. Lecz teraz do gry wkracza pole Higgsa, które nadaje masę bozonom W. I znowu dzieje się coś interesującego, a mianowicie brakujący neutralny bozon W (zwany W^0) zostaje splątany z bozonem B, dając dwie nieznacznie różniące się cząstki. Gdybyśmy wyobrazili sobie te cząstki jako dwie grudki ciasta, okazałoby się, że większość ciasta B została zmiksowana z odrobiną ciasta W^0, dając nową grudkę ciasta, znaną jako pozbawiony masy foton. Natomiast resztki ciasta B i W^0 skleiły się, tworząc kolejną grudkę, cząstkę, która staje się bardzo ciężka, podobnie jak obdarzony ładunkiem elektrycznym bozon W. To cząstka, z którą się jeszcze nie spotkaliśmy: bozon Z – „Z”, ponieważ

ma zerowy ładunek elektryczny, ale również dlatego, że to ostatni element w historii Modelu Standardowego. W naturze bozony W^0 i B nigdy nie pojawiają się samodzielnie, ale jedynie w tych dwóch mieszaninach: fotonie i bozonie Z.

Ponieważ obydwie cząstki powstały z tego samego miksowania, foton i bozon Z są z sobą blisko spokrewnione. Oddziałują niemal w ten sam sposób, choć jest jedna różnica: bozon Z może też oddziaływać z neutrinami. W języku diagramów Feynmana jest on reprezentowany przez linię falistą, podobnie jak bozon W i foton.

Jednak między bozonem Z i fotonem jest też jedna poważna różnica: wskutek oddziaływania z polem Higgsa bozon Z zyskuje masę. Jest nawet cięższy od znanego nam bozonu W, blisko 97 razy cięższy od protonu. I podobnie jak foton, cząstka światła, z którą jesteśmy najbardziej oswojeni, pozwalająca ludzkiemu oku dostrzegać świat, bozon Z w istocie jest mieszaniną dwóch głębiej ukrytych składników, bozonów B i W^0, związanych z sobą mechanizmem Higgsa. Ostatecznie oddziaływanie elektromagnetyczne nie jest fundamentalną własnością Wszechświata, ale wyłania się z modelu elektrosłabego.

Kto by pomyślał...

Ostatnie prace nad Modelem Standardowym

Opracowana w 1968 roku teoria elektrosłaba dotrwała w niezmienionym kształcie do dnia dzisiejszego i wyjaśnia dwa oddziaływania z Modelu Standardowego. Obrazu dopełnia dodanie oddziaływania silnego, przy czym wszystkie trzy bazują na symetrii cechowania, dzięki której mogą odgrywać swoją rolę. Mamy dwanaście cząstek materii i trzy oddziaływania. Oddziaływanie silne opiera się na symetrii związanej z ładunkiem, który może przyjmować trzy stany, „czerwony”, „zielony” i „niebieski”. Oddziaływanie słabe opiera się na symetrii związanej z ładunkiem, który może przyjmować dwa ustawienia: dwie cząstki w słabych

parach (na przykład elektron i neutrino elektronowe). Wreszcie istnieje symetria stowarzyszona z ładunkiem, który może mieć tylko jedno ustawienie, zwykłą liczbę. Mechanizm Higgsa miesza z sobą respektujący tę symetrię bozon B i neutralny bozon W^0 związany z symetrią w oddziaływaniu słabym, co oznacza, że żadna z tych cząstek nie pojawia się na świecie, za to otrzymujemy dwie mieszaniny: foton i bozon Z. Obdarzone ładunkiem bozon W i bozon Z zyskują masę dzięki polu Higgsa, podczas gdy foton pozostaje bez masy.

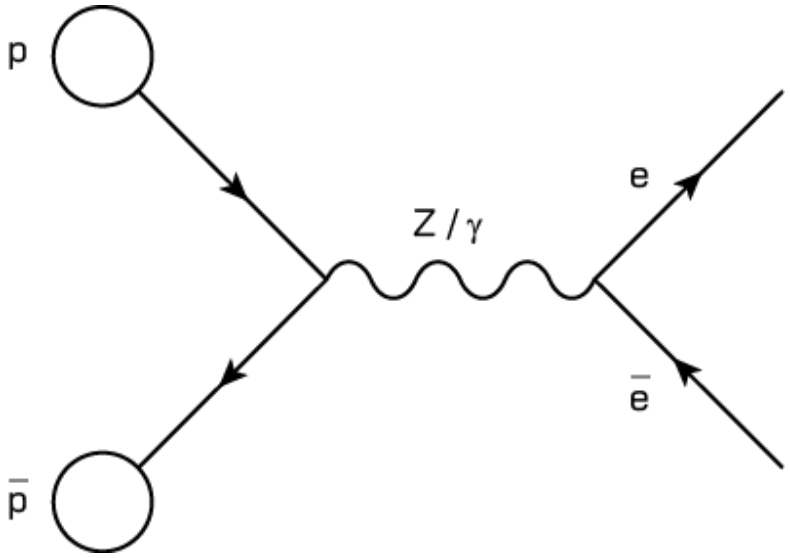
Mechanizm Higgsa rozwiązuje problem z bozonami oddziaływania słabego, a model elektrosłaby mówi również, że wszystkie cząstki zyskują masę w ten sam sposób: elektron, mion, taon i kwarki. Kluczem do wszystkiego jest mechanizm Higgsa.

Czy cokolwiek z tego, co napisaliśmy, opisuje zdarzenia realne? To pytanie przez piętnaście lat od powstania modelu elektrosłabego pozostawało otwarte. Jeżeli mamy traktować te symetrie poważnie, muszą zachodzić pewne dziwne zjawiska. Musi istnieć wypełniające Wszechświat energią pole Higgsa. Foton faktycznie jest dziwną mieszaniną bozonu B i neutralnego bozonu W^0. I wreszcie pozostaje kwestia „ciężkiego fotonu”, czyli bozonu Z, którego nikt nigdy nie widział.

Problem z bozonem Z jest tego samego rodzaju co ten z bozonem W: duża masa sprawia, że oddziaływania zdarzają się rzadko. Bozon Z wiąże się z gigantycznym „kosztem dostawy”. Można to przezwyciężyć za pomocą zasady nieoznaczoności, lecz wysokość wiążącego się z tym kredytu sprawia, że oddziaływania zdarzają się rzadko. To samo dotyczy naładowanych bozonów W, jednak to cząstka unikatowa, gdyż takie procesy jak rozpad beta mogą się zdarzyć tylko pod warunkiem, że bozon W istnieje. Tymczasem większość interakcji, jakie są możliwe z bozonem Z, może zachodzić również z fotonem, ale niższym kosztem, dlatego próba wytropienia mikroskopijnego dodatkowego wkładu ze strony bozonu Z jest niczym szukanie igły w stogu siana. Istniały pewne wskazówki – tak zwane prądy neutralne, oddziaływania z udziałem neutrin, których nie można było wyjaśnić za pomocą fotonów – jednak ostateczny

dowód pojawił się w 1983 roku. Supersynchrotron Protonowy (SPS – Super Proton Synchrotron), akcelerator w CERN, osiągnął wystarczająco dużą energię, żeby wyprodukować w laboratorium bozony W i Z. Wspomnę o nim jeszcze w następnym rozdziale, ale chodzi o to, że dzięki zderzaniu protonów i antyprotonów w dostatecznie wysokiej energii udało się pokryć koszt dostarczenia bozonów W i Z i nagle interakcje z ich udziałem stały się wysoce prawdopodobne.

Dobrym przykładem jest przedstawione na poniższym diagramie Feynmana odkrycie bozonu Z, powstałego w trakcie wytwarzania elektronu i pozytonu. W zderzeniu bierze udział kwark z protonu i antykwark z antyprotonu. Dochodzi do ich anihilacji i powstania fotonu lub bozonu Z, co oznaczono jako linię Z/g, ponieważ nie potrafimy powiedzieć, który z nich faktycznie został wytworzony. Następnie bozon Z lub foton rozpada się na elektron i pozyton:



Wytwarzanie elektronu i pozytonu w SPS

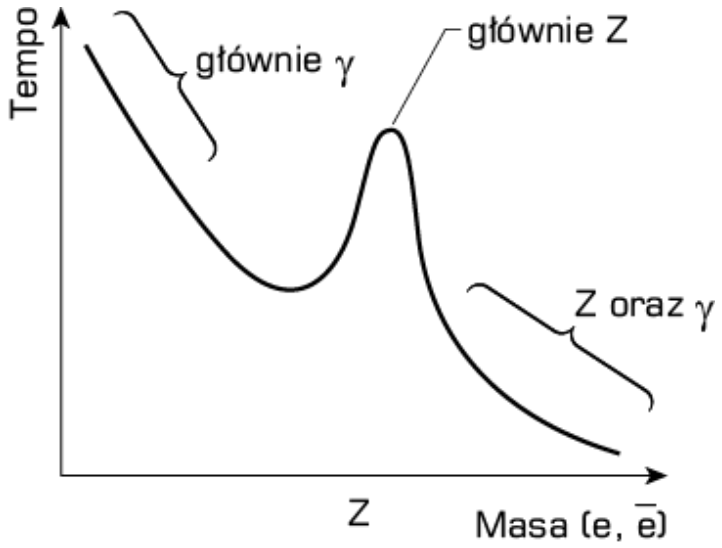
Mierząc energię powstałego pozytonu i elektronu, możemy określić ilość energii, jaka została zaangażowana w zderzenie. A dzięki równaniu $E = mc^2$ uda się powiązać tę energię z masą cząstek wirtualnych w centrum diagramu Feynmana (pojedyncze diagramy

Feynmana nie mówią wszystkiego o tym, co się fizycznie dzieje, ale stanowią dobre przybliżenie). W niskich energiach kosztowny bozon Z jest mocno stłumiony i dominują procesy fotonowe. Wraz ze wzrostem energii, czy też ze wzrostem masy cząstek wirtualnych, całkowite tempo tego typu reakcji spada. W wysokich energiach mamy mniejsze szanse na znalezienie elektronów i pozytonów, ponieważ wirtualny foton musi „pożyczyć" energię, żeby tego dokonać.

Jednak wraz ze wzrostem energii do poziomu masy bozonu Z pożyczka przestaje być potrzebna. Jeżeli nadciągające kwark i antykwark mają wystarczająco dużo energii, mogą wyprodukować bozon Z bez pożyczania dodatkowej energii z zasady nieoznaczoności i tempo procesu wzrasta. To właśnie zaobserwowano w 1983 roku, udowadniając jedno z kluczowych przewidywań elektrosłabej części Modelu Standardowego. Bozon Z, „ciężki foton", rzeczywiście istnieje.

Obecnie w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) możemy osiągać dużo wyższe energie. Prawdę mówiąc, gdy obserwujemy elektron i pozyton, których łączna masa dalece przekracza masę bozonu Z, nie ma znaczenia, czy w procesie brał udział foton, czy bozon Z. Aby osiągnąć taką masę, każde z nich musiało pożyczyć dodatkową energię. W ostatecznym rozrachunku obydwie cząstki biorą udział w mniej więcej równym stopniu. W dostatecznie wysokich energiach symetria między tymi dwoma oddziaływaniami zostaje przywrócona.

I właśnie to obserwujemy. Spodziewamy się, że wystąpią trzy zjawiska: stały spadek tempa procesu zdominowanego przez fotony, wzrost dla bozonu Z, a następnie udział fotonu i bozonu Z będzie się kształtował na niemal równym poziomie. I we wszystkich trzech obszarach teoria doskonale pasuje do danych:

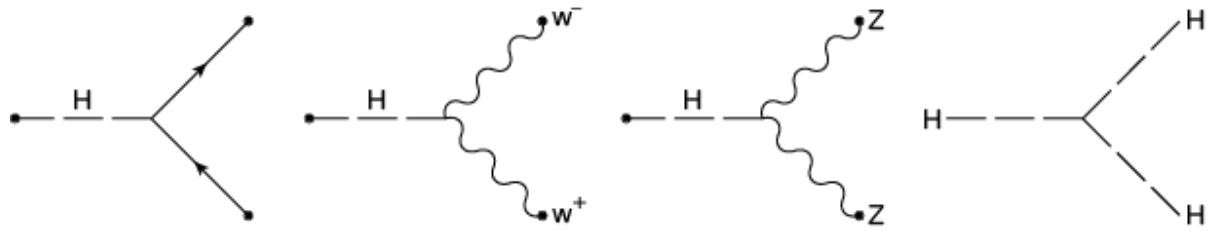


Tempo produkcji w LHC dla różnych połączonych mas elektron + pozyton

Polowanie na Higgsa

Nawet po odkryciu bozonu Z wciąż aktualne pozostawało pytanie, czy pole Higgsa rzeczywiście istnieje, czy też za „złamanie symetrii elektrosłabej" odpowiedzialne jest coś innego. Było wiele innych pomysłów na to, jak uwzględnić masę cząstek w Modelu Standardowym, toteż potrzebny okazał się bezpośredni dowód na istnienie samego pola Higgsa. Wracając do 1964 toku, przypomnę, że redakcja czasopisma początkowo odrzuciła artykuł Petera Higgsa, stwierdzając, iż nie ma on „oczywistego związku z fizyką". Zatem Higgs uzupełnił go i wysłał do innego czasopisma – właśnie w tej dodanej przez niego części po raz pierwszy znalazło się jawne sformułowanie, co mogłoby takim dowodem być. Prawdopodobnie dlatego cała idea zwykle kojarzona jest z jego nazwiskiem. Jeżeli pole Higgsa rozciąga się w całym Wszechświecie, musi towarzyszyć mu cząstka: bozon Higgsa. Jest ona równoważna fali w melasie, tak jak foton jest równoważny fali w polu elektromagnetycznym. Znajdź bozon Higgsa, a zdobędziesz dowód na to, że cała ta szalona idea symetrii cechowania i modelu elektrosłabego była poprawna.

Bozon Higgsa oddziaływałby z każdą cząstką, która ma masę – to właśnie drogą tych oddziaływań cząstki zdobywają masę – zatem możemy narysować zbiór diagramów Feynmana dla bozonu Higgsa – a ponieważ sam bozon Higgsa również ma masę, muszą one zawierać wierzchołek „samooddziaływania", gdzie jeden bozon Higgsa może rozszczepić się na dwa:



Składniki diagramu Feynmana dla bozonu Higgsa, od lewej do prawej: oddziaływanie z fermionami, bozonami W, bozonami Z oraz z innymi bozonami Higgsa

Te diagramy pozwalają obliczyć, jak może zachowywać się bozon Higgsa i jakiego rodzaju sygnały może produkować w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Niestety, o ile teoria mówi nam, że bozon Higgsa powinien istnieć i jak powinien się zachowywać, o tyle daje bardzo niewielkie pojęcie o tym, gdzie go szukać. Nie mówi, jak ciężki jest bozon Higgsa. Niemniej jednak dzięki dostatecznie potężnemu akceleratorowi cząstek powinno nam się udać na tyle silnie uderzyć pole Higgsa, by wywołać fale. Tyle że nie wiadomo było, jak potężny musi być akcelerator. Od 1983 roku kolejne maszyny osiągały coraz wyższe energie, a bozonu Higgsa ani śladu. To była ostatnia wielka tajemnica Modelu Standardowego: czy ów bozon istnieje? Jeżeli nie, to czy model elektrosłaby jest błędny? Inspirowany tym Leon Lederman, laureat Nagrody Nobla, w swojej opublikowanej w 1993 roku książce popularnonaukowej nazwał bozon Higgsa „boską cząstką", jak gdyby była kluczem do wszystkiego. A może taki był pomysł wydawcy. Plotka głosi, że w rzeczywistości Lederman chciał ją nazwać „przeklętą cząstką", ponieważ okazała się tak nieuchwytna. Ta plotka brzmi prawdziwie, bo dzisiaj żaden fizyk

cząstek nie nazwałby bozonu Higgsa boską cząstką! Tak, jest on ważny, ale istnieją znacznie ważniejsze kwestie, o czym przekonamy się w rozdziale 8.

Wielki Zderzacz Hadronów został zaprojektowany do działania w tak wysokich energiach, że wreszcie pomógł nam rozstrzygnąć tę kwestię. Jeżeli bozon Higgsa w ogóle istniał, musiał się tam pokazać. Jeżeliby nie istniał, LHC sprawiłby, że Model Standardowy znalazłby się w punkcie krytycznym: teoria bez bozonu Higgsa przewidywała, że bozon W zacznie robić rzeczy niezgodne z fizyką, co znaczyło, iż w danych naprawdę musi pojawić się coś nowego – nowa cząstka lub nowe oddziaływanie, które posprzątałyby ten bałagan.

Zatem kiedy w 2010 roku włączono LHC, po ponad dwudziestu latach planowania i budowania, towarzyszyło temu ogromne podniecenie i napięcie. I już po dwóch latach pojawiła się odpowiedź. Bozon Higgsa został odkryty w eksperymentach ATLAS i CMS. Po 44 latach rozwiązano zagadkę i zamknięto Model Standardowy – w następnym rozdziale dokładniej wyjaśnię, na czym polegało to odkrycie.

...I odpręż się

W tym rozdziale było sporo do udźwignięcia. Bozon Higgsa to szczególny rodzaj stworzenia, stanowił centrum ogromnej liczby przeprowadzanych w CERN fundamentalnych badań natury i zawsze jestem mile zdziwiony tym, jak wiele spotykanych przeze mnie osób słyszało o Higgsie i LHC. Jednocześnie naprawdę trudno jest zrozumieć, co bozon Higgsa rzeczywiście robi, nawet komuś z tytułem doktora fizyki cząstek. Prawda jest taka, że Model Standardowy został zbudowany na podstawie jakichś abstrakcyjnych symetrii cechowania, którym najwyraźniej podporządkowany jest cały Wszechświat, a wszystkie oddziaływania są ich konsekwencją. Że Wszechświat wypełniony jest energią zmagazynowaną w polu Higgsa. Że niektóre z bozonów cechowania przywierają do tego pola, łamiąc symetrię cechowania i zyskując masę. Że teraz wszystkie

fermiony muszą robić to samo. A foton, który znamy i kochamy, to w gruncie rzeczy jakaś dziwna mieszanina bozonów B i W^0, dwóch cząstek, których nigdy nie będziemy w stanie zobaczyć oddzielnie.

Równocześnie istnieje proste, jednozdaniowe podsumowanie tego, co robi bozon Higgsa: nadaje masę innym cząstkom. I muszę przyznać, że chwytliwa nazwa „boska cząstka" zdecydowanie zostaje w pamięci, lecz nieco głębsze rozumienie tego, czym rzeczywiście jest mechanizm Higgsa i jak wpasowuje się w obraz całości, otwiera nowe okno na dziwny, abstrakcyjny i piękny świat cząstek subatomowych.

Bez mechanizmu Higgsa Wszechświat byłby zupełnie innym miejscem. Jak wyjaśniam w rozdziale 4, proton nadal zachowałby większość swojej masy, ponieważ wynika ona z efektu chromodynamiki kwantowej, której siły ściskają kwarki w małej przestrzeni. Natomiast wszystkie fundamentalne fermiony byłyby bezmasowe – w tym również elektron. Wszystkie cząstki pozbawione masy nieustannie poruszają się z prędkością światła, zatem elektrony pędziłyby zbyt szybko, żeby dać się uwięzić w atomach. Nie istniałaby cała chemia, a więc całe życie, jakie znamy. W dodatku bozon W byłby bezmasowy, co znaczy, że oddziaływanie słabe nie byłoby tłumione i elektrony mogłyby nieustannie zmieniać się w neutrina i z powrotem. Trudno wyobrazić sobie Wszechświat bez Higgsa inaczej jak puste miejsce, w którym izolowane od siebie cząstki śmigają, mijając się pośród zimnej, czarnej nocy.

Po trzech rozdziałach dość ciężkiej fizyki teoretycznej czas wrócić do czegoś bardziej praktycznego: jak działają maszyny w rodzaju Wielkiego Zderzacza Hadronów, a także w jaki sposób eksperymenty ATLAS i CMS znalazły bozon Higgsa, a teraz szukają czegoś całkiem nowego.

ROZDZIAŁ 7

NAJWIĘKSZY EKSPERYMENT

Genewa jest miastem wciśniętym we francuskojęzyczny kąt Szwajcarii, położonym na brzegu Jeziora Lemańskiego (albo Genewskiego, jeśli posługujecie się językiem francuskim równie biegle jak ja), od północy zamykają je góry Jury, a od południa ośnieżone szczyty Alp. Prosta katedra genewska przypomina o szesnastowiecznych wpływach Jana Kalwina i reformacji. Jakieś czterysta lat później miasto stało się domem dla uciekających przed wojenną zawieruchą artystów i myślicieli. Obecnie siedzibę mają tu liczne instytucje międzynarodowe i firmy o zasięgu światowym, w tym Czerwony Krzyż i Organizacja Narodów Zjednoczonych. Na północno-zachodnich przedmieściach znajduje się miasteczko Meyrin. Kiedyś była to urokliwa wioska, ale w połowie XX wieku, gdy sądzono, iż beton jest odpowiedzią na wszystkie potrzeby, w Meyrin pojawiły się wieżowce. To tutaj, maszerując latem wzdłuż pól słoneczników, przy dźwięku krowich dzwonków, albo zimą pod niebem permanentnie zasłoniętym przez nisko zawieszone, szare chmury, znajdujemy ośrodek CERN.

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, bo tak brzmi jego pełna nazwa, został założony w 1954 roku, po części jako odpowiedź na amerykański projekt Manhattan, a także dlatego, że zdano sobie sprawę, iż szukanie odpowiedzi na wielkie pytania nauki wymaga współpracy na bezprecedensowo wielką skalę. Członkami CERN jest obecnie dwadzieścia jeden państw europejskich, kilka innych z całego świata jest do pewnego stopnia zaangażowanych. W głównej siedzibie pracują tysiące osób, jeszcze więcej na uniwersytetach i w laboratoriach badawczych na całym świecie.

Podobnie jak Meyrin, CERN trochę przypomina pomnik architektury brutalistycznej, stanowi dowód tego, że idee mogą rozkwitać w niemal każdym środowisku. Patrząc na ponure budynki biurowe i magazynowe, nie można odgadnąć, co dzieje się pod nogami albo skąd tutaj tyle intelektualnej energii. Dopiero kiedy odwiedzi się jedno z pomieszczeń kontrolnych, pod sufit zapełnione ekranami wyświetlającymi skomplikowane histogramy i obrazy, albo któreś z centrów obliczeniowych, wielkie pomieszczenia wypełnione po brzegi szafami z obwodami komputerowymi, staje się jasne, że dzieją się tu rzeczy niezwykłe. Jedną z tych niezwykłości jest Wielki Zderzacz Hadronów, najpotężniejszy na świecie akcelerator cząstek, umieszczony w tunelu o kształcie torusa o średnicy 27 kilometrów, położonym na głębokości około 100 metrów pod ziemią. Wychodzi poza teren ośrodka, biegnie pod okolicznymi polami, przecina granicę z Francją i wraca do ośrodka. Po odkryciu tutaj bozonu Higgsa może to być miejsce, w którym zostanie ujawniona następna tajemnica Wszechświata.

Rozbijanie atomów

LHC jest największym i najnowszym akceleratorem cząstek na świecie, szczytowym osiągnięciem techniki, która była stale rozwijana od początku XX wieku. Przyspiesza protony do prędkości, która jest bardzo bliska największej prędkości, jaką można uzyskać we Wszechświecie, czyli prędkości światła (dokładnie jest to 99,999999 procent prędkości światła), a następnie rozbija je w czołowym zderzeniu. LHC dokonuje tych zderzeń w wyższych energiach niż w jakimkolwiek wcześniejszym eksperymencie – blisko siedem razy większych od poprzedniego rekordu, który należał do amerykańskiego Tevatronu.

Warto umieścić tę rekordową wartość energii w odpowiednim kontekście. Jeśli przypomnimy sobie, ile waży pojedynczy proton ($1{,}7 \times 10^{-27}$ kg), nie jest to imponująca liczba w odniesieniu do

naszych codziennych doświadczeń i ogromna energia wkładana w zderzenia w LHC wydaje się mniej znacząca – to mniej więcej energia komara w locie. Różnica polega na tym, że LHC przekazuje energię pojedynczym protonom dla każdego zderzenia. Jeśli przypomnimy sobie, jak niewielkich rozmiarów jest proton (10^{-15} metra, czyli porażająco mały), oznacza to, że *gęstość* energii jest ogromna. W drobnym ułamku sekundy, w którym dochodzi do każdej kolizji, LHC upycha niewielką porcję energii w jeszcze mniejszej przestrzeni, wytwarzając warunki niepodobne do czegokolwiek, co udało się osiągnąć w laboratorium badawczym.

Dlaczego to jest ważne? Obserwując Wszechświat z dzisiejszej perspektywy, dostrzegamy, że się rozszerza. W przeszłości kosmos musiał być mniejszy, a około 13,8 miliarda lat temu wszystko musiało znajdować się w jednym miejscu, w którym doszło do Wielkiego Wybuchu. Nie mamy pojęcia, co stało się w Wielkim Wybuchu, jednak w tamtej chwili cały Wszechświat zamknięty był w niewiarygodnie małej przestrzeni. Gwałtownie zwiększył swą objętość, rosnąc od niczego do rozmiarów ziarenka piasku, później do rozmiarów piłki, do rozmiarów Ziemi, Układu Słonecznego, Drogi Mlecznej, a wszystko to działo się w kilku pierwszych sekundach. Wszechświat kontynuuje ekspansję i się ochładza. Skrawek, który dziś możemy oglądać, ma średnicę około 90 miliardów lat świetlnych. Pomiędzy planetami, gwiazdami i galaktykami jest wiele pustej przestrzeni, a temperatura spadła obecnie do wartości 2,7 K, czyli –270°C.

Zaraz po Wielkim Wybuchu Wszechświat był zupełnie innym miejscem niż teraz. Jeżeli weźmiemy galaktyki, gwiazdy i wszystko inne, a potem wciśniemy to w przestrzeń o rozmiarach pudełka na buty, uzyskamy warunki charakteryzujące się skrajnie wysoką temperaturą i gęstością. I to właśnie jest związek, o który nam chodzi: gęstość energii w zderzeniach generowanych w LHC jest równoważna gęstości energii całego Wszechświata w milionowej części jednej milionowej sekundy po Wielkim Wybuchu. Rodzaj wytwarzanych przez nas cząstek i oddziaływań obserwowanych w LHC odpowiada temu, co w tamtym czasie wypełniało cały

Wszechświat. Badanie tych zderzeń może opowiedzieć nam o siłach, które ukształtowały Wszechświat do tej formy, jaką ma on dzisiaj, może dać informacje na temat pochodzenia cząstek, z których zbudowane jest wszystko, co widzimy, jak też wskazać na istnienie innych cząstek, których jeszcze nie odkryliśmy.

Prawdopodobnie LHC jest najbardziej znany z odkrycia bozonu Higgsa. W poprzednim rozdziale omówiłem teoretyczne podstawy cząstki Higgsa, teraz wytłumaczę, jak doszło do jej zaobserwowania – jak działa akcelerator i detektor cząstek oraz w jaki sposób możliwość istnienia tej nowej cząstki została przemieniona w rzeczywistość.

Chcecie więc odtworzyć warunki panujące we wczesnym Wszechświecie

Aby odtworzyć warunki panujące w bardzo młodym Wszechświecie, w pierwszym rzędzie LHC potrzebuje protonów. W istocie można je zdobyć bez trudu – wodór jest najpowszechniej występującym we Wszechświecie pierwiastkiem, natomiast atom wodoru składa się z jednego elektronu krążącego wokół jednego protonu. Wystarczy wybić elektron i... voilà, mamy proton. CERN wykorzystuje do zasilania LHC w protony jeden niewielki zbiornik z gazowym wodorem, mniej więcej o masie 5 kilogramów. Wydaje się, że to niewiele, ale atomy są bardzo małe, przez co 5 kg wodoru to około 3×10^{27} atomów wodoru. To jedna z tych śmiesznie wielkich liczb, które trudno sobie wyobrazić, najlepiej więc pokazać ją w pewnej analogii: gdyby każdy z tych atomów miał rozmiary futbolówki, taka ilość wodoru byłaby mniej więcej rozmiarów Ziemi. Zbiornik zawiera dostatecznie dużo wodoru, aby zaopatrywać LHC w protony przez ponad miliard lat.

Aby wykorzystać protony znajdujące się w atomach wodoru, elektrony muszą być usunięte. Robi się to za pomocą pola elektrycznego, przykładając do zbiornika napięcie, choćby z sieci

elektrycznej. Dla cząstki przenoszącej ładunek elektryczny przebywanie w polu elektrycznym jest niczym usadowienie na szczycie wzgórza: cząstki naładowane dodatnio będą staczać się ruchem przyspieszonym po jednej stronie wzgórza (w kierunku ujemnego bieguna źródła napięcia), natomiast te naładowane ujemnie będą staczać się ruchem przyspieszonym po jego drugiej stronie (w kierunku dodatniego bieguna źródła napięcia) – jest to prosty sposób opisu oddziaływania cząstek bez konieczności rozrysowywania wielu diagramów Feynmana!

W atomie wodoru obdarzony ładunkiem ujemnym elektron krąży wokół dodatnio naładowanego protonu. Jeśli umieści się atom wodoru w słabym polu elektrycznym, nic się nie stanie – owszem, elektron i proton chętnie stoczyłyby się po dwóch przeciwległych stronach wzgórza, ale działa pomiędzy nimi siła wzajemnego przyciągania. Dopiero gdy zbocze wzgórza robi się odpowiednio strome (co znaczy, że przyłożone napięcie jest dostatecznie duże), elektron i proton rozłączą się i udadzą każdy w swoją stronę. Tak się składa, że do rozdzielenia atomu wodoru na proton i elektron trzeba naprawdę stromego zbocza. Pierwszy etap działań LHC związany jest z noszącym spektakularną nazwę „duoplazmotronem", który wykorzystuje napięcie 90 000 woltów do rozdzielenia cząstek tworzących atom wodoru (proces jest nieco bardziej złożony, ponieważ atomy wodoru łączą się z sobą, tworząc cząsteczkę H_2, ale sama idea działania jest taka sama). Takie napięcie mocno przekracza 230 woltów domowych sieci elektrycznych, ale to chyba dobrze, że napięcie w domowej sieci elektrycznej nie rozrywa atomów.

Kiedy protony stoczą się już z 90 000-woltowego wzgórza w duoplazmotronie, będą się dość szybko poruszać i jest to dobry moment, aby wprowadzić podstawową jednostkę energii, używaną w fizyce cząstek: eV, czyli elektronowolt. Jeden elektronowolt to ilość energii, jaką zyska elektron, gdy będzie przyspieszany przez napięcie równe 1 V (wolt). Proton przenosi tyle samo ładunku elektrycznego co elektron (tylko przeciwnego znaku), tak więc po przyłożeniu napięcia 1 V zyskuje tyle samo energii, jest jednak od elektronu znacznie

cięższy, przez co porusza się od niego wolniej. Tak czy inaczej, nie jest to duża energia. Porównując ją z wartością, która jest nam dobrze znana z codziennych doświadczeń, można powiedzieć, iż jedna kaloria to mniej więcej 400 tysięcy miliardów miliardów eV, a tylko jeden banan zapewnia 100 kalorii.

Używamy także „jednostek naturalnych", które uzyskujemy po przyjęciu, iż prędkość światła, c = 299 792 458 m/s, jest równa 1. Jest to równoważne z uznaniem, iż jedna sekunda to czas, w jakim światło pokonuje odległość 1 metra (mniej więcej 3,3 nanosekundy), oraz ma tę zaletę, iż $E = mc^2$ staje się po prostu $E = m$. Teraz masę (a nawet pęd) można wyrazić w jednostkach eV. Na przykład masa elektronu to 511 keV, protonu 938 MeV, a bozonu W 80 GeV (informacje o stosowanych przedrostkach jednostek znajdziecie w Dodatku).

Obecnie LHC osiąga energie rzędu 13 TeV (13 bilionów eV), przyspieszając każdy proton do 6,5 TeV w przeciwnym kierunku, zanim cząstki zostaną doprowadzone do czołowego zderzenia. To wciąż znacznie mniej niż zawartość energetyczna jednego banana, ale przypominam, że w zderzeniach cząstek ważna jest gęstość energii, czyli wciśnięcie jej w bardzo mały skrawek przestrzeni.

Aby nadać protonom takie energie, potrzeba naprawdę wielkich napięć.

Surfując przez historię

Opuściwszy duoplazmotron, protony zaczynają wędrówkę wokół CERN, podróż, która jest jednocześnie wycieczką przez historię akceleratorów cząstek. Mają na swej drodze kilka stanowisk, z których każde było w swoim czasie szczytowym osiągnięciem techniki, ale obecnie jest tylko elementem przyspieszającym protony przed puszczeniem ich w dalszą podróż. Pierwszy jest akcelerator liniowy albo liniak. Mówiąc precyzyjnie, jest to Linac 2, który pod koniec lat siedemdziesiątych XX wieku zastąpił – jakżeby inaczej –

Linac 1. Jak we wszystkich liniakach, cząstki przyspieszane są w linii prostej, a Linac 2 ma zaledwie nieco ponad 33 metry długości. Liniak ze Stanfordu w Kalifornii, uznawany za „najbardziej wyprostowany obiekt na świecie", ma długość nieco ponad 3 kilometrów i w 1968 roku był pierwszym akceleratorem cząstek dostatecznie potężnym, aby rozbijać protony na kwarki. Jedną z przyszłościowych idei możliwych do zrealizowania po zakończeniu eksploatacji LHC jest budowa nowego typu dużego liniaka.

Liniaki, jak ich kuzyni w kształcie koła, synchrotrony, należą do dwóch podstawowych konstrukcji nowoczesnych akceleratorów cząstek. Oba wykorzystują do przyspieszania cząstek pole elektryczne: umieszczają cząstkę na szczycie wzgórza, z którego dodatnio naładowane protony muszą zjechać w dół, stale przyspieszając w miarę tego zjazdu. Linac 2 przyspiesza protony do energii 50 MeV, 50 milionów elektronowoltów. Jeden ze sposobów osiągnięcia takich wartości polega, po prostu, na przyłożeniu do końców 33-metrowego liniaka napięcia o wartości 50 milionów woltów, co zamienia go w całości w jedno wielkie wzniesienie, z którego protony muszą się stoczyć. Tylko że skoro 90 000 woltów wystarczało do rozerwania atomów wodoru, przyłożenie napięcia milionów woltów do jakiegokolwiek sprzętu laboratoryjnego skończyłoby się dla niego fatalnie – zostałby doszczętnie zniszczony, zanim protony miałyby szansę cokolwiek zrobić.

Sztuczka, która pozwala uniknąć takiej katastrofy, jest dość pomysłowa: zamiast tworzyć wzgórze o stałej wartości napięcia, protony suną na oscylującym napięciu jak surferzy na falach oceanu. Oscylacyjne pole elektryczne generowane jest przez wnęki mikrofalowe – mikrofalowe dlatego, że pole oscyluje z częstotliwością analogiczną do częstotliwości tych fal elektromagnetycznych, setki milionów razy na sekundę. Zasadniczo wnęki są metalowymi skrzynkami o rozmiarach od 10 centymetrów do ponad 1 metra. Mają one dwa otwory – przez jeden z nich protony dostają się do wnętrza wnęki, przez drugi, po przeciwnej stronie, wnękę opuszczają. Kiedy są w środku, ściana za nimi powinna być naładowana dodatnio, ta przed nimi zaś naładowana ujemnie, aby cząstki były odrobinę przyspieszane. W momencie gdy

opuszczają wnękę, zmianie powinien ulec znak ładunku na ścianach – teraz druga ściana powinna być naładowana dodatnio, natomiast pierwsza ujemnie, a protony będą znowu odpychane. Kiedy do wnęki wpada kolejny proton, znak ładunku znowu się zmienia i proces się powtarza. Długi szereg wnęk ustawionych w jednej linii wytworzy przyspieszającą falę napięcia elektrycznego, która będzie zwiększać prędkość protonów. Obecnie niemal wszystkie akceleratory wykorzystują tę technologię.

Surfując wzdłuż akceleratora Linac 2, protony osiągają energię 50 MeV i są przesyłane do następnych urządzeń, które od tego miejsca, co do jednego, są synchrotronami. Kształt kołowy ma tę przewagę nad układem liniowym, że poruszające się po okręgu protony będą teraz przechodzić przez te same wnęki mikrofalowe, za każdym razem odrobinę zwiększając prędkość. Ogólnie synchrotrony mogą nadawać cząstkom wyższe energie w bardziej wydajny sposób, ale muszą utrzymywać je w torze kołowym. Taki kształt toru zapewniają pola magnetyczne.

Podczas gdy pole elektryczne jest niczym wzgórze, które przyspiesza cząstki, pola magnetyczne działają jak zakręty z nachylonym torem, zmieniając kierunek ruchu cząstki, ale nie wartość jej prędkości. W rozdziale 3 opisałem, w jaki sposób w pierwszych modelach komory mgłowej wykorzystano magnesy do zakrzywienia toru ruchu cząstek, tak że cząstki naładowane dodatnio i ujemnie poruszały się w przeciwnych kierunkach. To samo dzieje się tutaj. Pola elektryczne we wnękach mikrofalowych przyspieszają protony, a generowane przez wielkie magnesy pola magnetyczne zakrzywiają ich tor do tego stopnia, że poruszają się po okręgu. W rzeczywistości jest to zadanie wymagające niesamowicie uważnego zadbania o delikatną równowagę: natężenie pola magnetycznego musi rosnąć, w miarę jak cząstka porusza się coraz szybciej, ponieważ do utrzymania jej na tym samym torze kołowym potrzeba coraz większej siły. Aby nadać przyspieszenie protonom w odpowiednim momencie, pola elektryczne we wnękach mikrofalowych muszą być zsynchronizowane z położeniem cząstek z dokładnością do miliardowych części sekundy (stąd nazwa „synchrotron”). Zadanie to jest wykonalne dzięki komputerom, ale

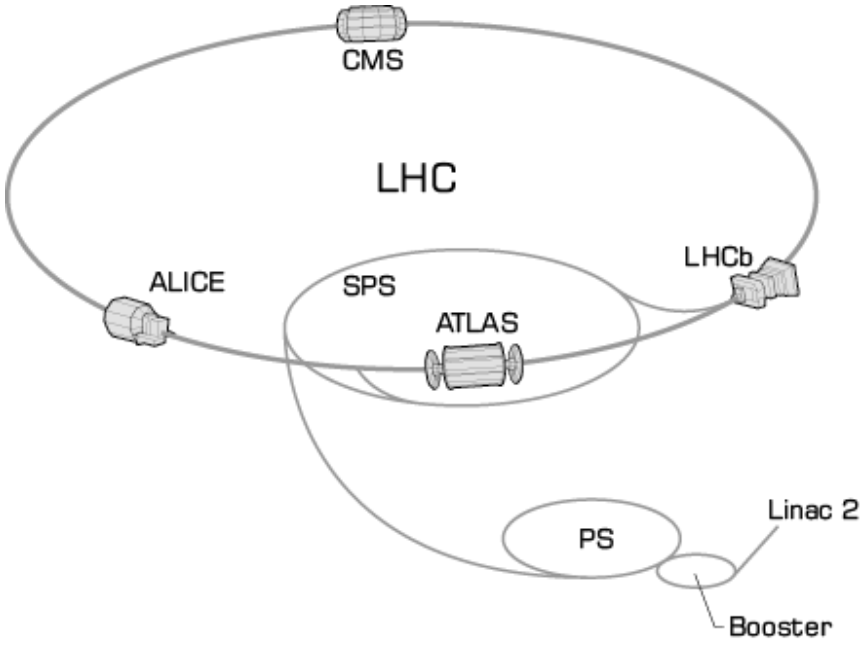
zapanowanie nad całością naprawdę jest częścią sztuki, jaką jest obsługa akceleratora cząstek.

Wróćmy do naszych protonów, które po przejściu przez Proton Booster Synchrotron (PBS) kontynuują podróż w konstrukcji noszącej nazwę Proton Synchrotron (PS). Akcelerator ten zbudowano w 1959 roku i była to wówczas najpotężniejsza maszyna tego typu na świecie. Na obwodzie 628 metrów protony przyspieszane są tu do 25 GeV. To właśnie ten akcelerator wytwarzał zderzenia cząstek badane w komorze pęcherzykowej Gargamelle, o której wspomniałem w rozdziale 3. Z PS protony przemieszczają się do SPS (Super Proton Synchrotron), kolejnej konstrukcji obdarzonej nazwą, która bezpośrednio odwołuje się do jej charakteru fizycznego. Zbudowany w 1976 roku akcelerator o obwodzie 7 kilometrów przyspiesza protony do energii 450 GeV. Do SPS nigdy nie należał światowy rekord, ponieważ akcelerator w amerykańskim Fermilabie w tamtym czasie był trochę mocniejszy. Niemniej jednak to w SPS wykonano eksperymenty, które doprowadziły do odkrycia bozonów W i Z, co stanowiło niezwykle ważny test teorii oddziaływań elektrosłabych, zbudowanej na mechanizmie Higgsa opisanym w poprzednim rozdziale.

Ostatecznie, po opuszczeniu SPS, protony trafiają do samego LHC. Ta monstrualna konstrukcja ma obwód o długości 27 kilometrów. Protony pakuje się w wiązki i wysyła w podróż wewnątrz tego pierścienia w dwóch przeciwnych kierunkach. LHC przyspiesza je do energii 6,5 TeV. Protony obdarzone taką energią dokonują pełnego obiegu pierścienia LHC ponad 10 000 razy na sekundę. Kiedy mają już maksymalną energię, wiązki krążą przez mniej więcej 12 godzin. Krążące w akceleratorze protony utrzymywane są na właściwym torze przez kolosalne, potężne magnesy – jest ich w sumie 1232, każdy o wadze około 35 ton i długości 14,3 metra wytwarza pole o natężeniu sięgającym 8,3 tesli. To mniej więcej 20 000 razy więcej niż natężenie pola typowego magnesu na lodówkę – posłużenie się taką liczbą pamiątek z wakacji w LHC byłoby wysoce niepraktyczne. Generowanie pola magnetycznego o takim natężeniu w kontrolowany sposób jest możliwe, gdy magnesy są nadprzewodnikami utrzymywanymi w temperaturze –271,25°C, czyli

1,9 stopnia powyżej zera bezwzględnego – nawet w próżni kosmicznej jest cieplej.

Aby doprowadzić wiązki do zderzenia, potrzebnych jest jeszcze więcej magnesów, które skupiają wiązki protonów, tak że są cieńsze od włosa. Potem wiązki są nieco odchylane po to, aby przecinały się w określonych punktach pierścienia. Doprowadzenie protonów do zderzenia wymaga szalonej precyzji: to tak, jakbyśmy wystrzeliwali z Londynu i Nowego Jorku dwie igły krawieckie, oczekując, że zderzą się w połowie drogi nad Atlantykiem. W miejscach gdzie dochodzi do zderzeń protonów (w LHC, nie nad Atlantykiem), zainstalowane są detektory cząstek – ATLAS, CMS, ALICE i LHCb – które tylko czekają, by zbadać efekty kolizji.



Zespół akceleratorów CERN, przyspieszający cząstki przed LHC

No to wiemy już, co dzieje się wewnątrz LHC, ale jak to wygląda? LHC znajduje się mniej więcej 100 metrów pod ziemią, w tunelu o średnicy około 4 metrów. Akcelerator zajmuje w przybliżeniu jedną czwartą tunelu, zostaje więc dużo przestrzeni, żeby stanąć w pozycji wyprostowanej, a nawet jeździć rowerem – jest to ulubiona metoda

poruszania się po nim, gdy trzeba przeprowadzić prace konserwacyjne na całej 27-kilometrowej długości tunelu. Protony podróżują wzdłuż „rury wiązki", której średnica to zaledwie 6 centymetrów. Są dwie takie rury, po jednej na każdą wiązkę protonów biegnącą w jednym z dwóch kierunków. Rury muszą być możliwie idealnie puste, w przeciwnym razie bowiem protony przepadłyby w przypadkowych zderzeniach z cząsteczkami powietrza. Utrzymywana jest w nich próżnia, a w zasadzie jest tam bardziej pusto niż w przestrzeni kosmicznej. Rury są otoczone przez wnęki przyspieszające i gigantyczne magnesy, toteż jeśli wybieracie się do tunelu, taki właśnie widok zastaniecie – urozmaicony sprzętem kriogenicznym do chłodzenia magnesów, wysokonapięciowymi instalacjami do zasilania wnęk przyspieszających i najróżniejszą aparaturą elektroniczną do monitorowania wszystkiego. Całość wymaga zasilania dużej mocy: w pełni funkcjonalny LHC pobiera około 200 megawatów, czyli mniej więcej tyle co miasto liczące 60 tysięcy mieszkańców.

Precyzyjna maszyneria

Na początku tego procesu bierzemy atom wodoru i rozbijamy go na protony i elektrony. LHC wykorzystuje protony, które w istocie są workami kwarków i gluonów. Nie sposób przewidzieć, czy w wyniku zderzenia z worka wyskoczy kwark, czy gluon, albo jak dużą energię całkowitą będzie miał proton – na pewno będzie to mniej niż pełne 6,5 TeV. Elektrony są cząstkami elementarnymi, toteż wnoszą w zderzenie całą swoją energię. Można więc się zastanawiać, dlaczego korzysta się z niewydajnych protonów, a nie elektronów.

Kiedy tor cząstki ulega zakrzywieniu, część jej energii jest tracona na emisję fotonów, zjawisko znane jako promieniowanie synchrotronowe. Trzymając się analogii, według której nasze cząstki surfują na fali pola elektrycznego, powiemy, że promieniowanie synchrotronowe jest niczym woda, którą surfer rozchlapuje w momencie dokonywania zwrotu, a takie rozchlapywanie zużywa

trochę energii. Lżejsze cząstki wytwarzają więcej promieniowania synchrotronowego niż cząstki cięższe. Dużo więcej. Współczynnik spada wraz z masą cząstki podniesioną do czwartej potęgi. Elektrony są około 2000 razy lżejsze od protonów i po osiągnięciu przez nie pewnej prędkości utrzymywanie ich na torze kołowym staje się zwyczajnie niemożliwe z powodu ilości traconej przez nie energii.

Na przykład tunel LHC był wcześniej wykorzystywany przez akcelerator LEP, w którym zderzano elektrony z ich antymaterialnymi partnerami, pozytonami. LEP uzyskiwał energie niewiele ponad 200 GeV, podczas gdy LHC, przyspieszający znacznie cięższe protony w tym samym 27-kilometrowym tunelu, osiąga energię 70-krotnie większą. W związku z tym jeśli w przyszłości Zderzacz elektronowo-pozytonowy ma wytwarzać jeszcze wyższe energie, to będzie to liniak, a nie synchrotron: zbudowanie akceleratora liniowego o długości wielu kilometrów wciąż jest o wiele łatwiejsze niż poradzenie sobie z promieniowaniem sychrotronowym. Tak czy inaczej, maszyny przyspieszające elektrony nigdy nie osiągną takich wartości energii, jakie są w zasięgu maszyn przyspieszających protony. Akceleratory protonów są generalnie maszynami „odkrywców” – wymagają wiele, ale przesuwają granice osiąganych energii. Akceleratory elektronów są natomiast maszynami „precyzji” – dostępne energie są niższe, ale ponieważ dobrze wiadomo, co wkładamy w każde zderzenie, możliwe jest szczegółowe badanie konkretnych oddziaływań.

Podczas gdy promieniowanie synchrotronowe stanowi dla akceleratorów problem, ma ono również kilka zastosowań. W placówkach takich jak Diamond Light Source (Diamentowe Źródło Światła) w Wielkiej Brytanii przyspiesza się elektrony po to, aby potem z rozmysłem wprowadzić je w ruch po szeregu ciasnych okręgów w celu wytworzenia bardzo czystych, niezwykle spójnych wiązek fotonów. Te nowe źródła światła stosuje się do badania struktury materiałów, jak zrobiła to Rosalind Franklin, gdy posłużyła się promieniowaniem rentgenowskim, aby po raz pierwszy ujawnić strukturę podwójnej helisy DNA. Promieniowanie synchrotronowe pojawi się jeszcze później, gdy będziemy omawiać detektory cząstek; w tej dziedzinie znane jest jako *Bremsstrahlung* (ten niemiecki wyraz

można przetłumaczyć jako „promieniowanie hamowania”). Jest to część międzynarodowego języka fizyki cząstek, który stanowi mieszankę słów zaczerpniętych z języka angielskiego, niemieckiego, francuskiego, greckiego, rosyjskiego i innych, doprawioną naszymi własnymi wynalazkami. Tym, co szczególnie lubię w pracy w CERN, gdzie przebywają badacze tak wielu różnych narodowości, jest rozwiązywanie zagadek z zasłyszanych fragmentów rozmów, gdy całkowicie niezrozumiała, prowadzona podniesionymi głosami dyskusja nagle nabiera sensu po usłyszeniu dziwnie brzmiących słów: „mion”, „NLO”, „kalorymetr” lub „Higgs”.

Badanie miejsca zderzenia

Koniec końców, wiele wytwarzanych w LHC zderzeń wygląda identycznie. W jednym może powstać kwark wysoki i antykwark, jak opisałem to w rozdziale 5, albo Z/γ, jak tłumaczyłem w rozdziale 6, albo tysiące innych możliwych produktów – ponieważ LHC zderza protony, w większości zderzeń jest produkowanych dużo kwarków i gluonów, związanych w nowych hadronach.

Jeśli powstają jakieś bardziej egzotyczne cząstki Modelu Standardowego, to rozpadają się na długo przed tym, gdy można przeprowadzić ich bezpośredni pomiar. Po wszystkich tych rozpadach zderzenie staje się tylko rozpryskiem cząstek, które żyją dostatecznie długo, a lista takich cząstek jest krótka: obejmuje elektrony i miony, jeszcze taony, które, zanim się rozpadną, są w stanie pokonać odległość tylko kilku milimetrów, co czasem jest podstawą do ich identyfikacji. Z wielu różnych hadronów, których obecność można udowodnić, na liście znajdują się tylko proton i neutron, pion, kaon i kilka innych. Niektóre hadrony zawierające kwarki niski i dziwny również przemieszczają się zaledwie kilka milimetrów, zanim ulegną rozpadowi, toteż czasem omyłkowo bierze się je za taon. Zwykle w zderzeniach wiązek kolimowanych, które opisałem w rozdziale 4, powstają wszystkie te hadrony. Na koniec jest jeszcze foton. Neutrina nie wchodzą w oddziaływania, nie można więc dokonać ich

bezpośredniego pomiaru, jednak o obecności tych cząstek można wnioskować z pewnych przesłanek – wrócę do tego zagadnienia w następnym rozdziale. To już wszystko.

Pojedyncze zderzenie może skutkować powstaniem setek tych wykrywalnych cząstek. Zadanie polega na poukładaniu wszystkich skrawków danych, podjęciu próby rekonstrukcji tego, co zaszło. Przypomina to sytuację, gdy znajdujemy drobny fragment potłuczonej ceramiki i staramy się odgadnąć, czy był on kiedyś częścią talerza, może dzbanka, a może czegoś bardziej interesującego – dla archeologa byłaby to jakaś figurka, dla fizyka bozon Higgsa. Zadanie staje się łatwiejsze, gdy uda się znaleźć więcej fragmentów, eksperyment musi więc obejmować swym zasięgiem pewien obszar wokół zderzenia, aby wychwycić tyle cząstek, ile się da. Następnie potrzebujemy możliwie najwięcej informacji o każdym fragmencie – jaka to cząstka, ile miała energii, w którym kierunku się poruszała i tak dalej. Każda informacja pomaga dokonać rekonstrukcji.

Większa część detektora ATLAS, zaprojektowanego na potrzeby eksperymentu, przy którym pracuję, wykorzystuje tę samą podstawową zasadę, na której opiera się działanie komory mgłowej Wilsona, opisanej przeze mnie w rozdziale 3. Chodzi o jonizację – kiedy obdarzona ładunkiem elektrycznym cząstka przelatuje w pobliżu atomu, prawdopodobne jest wybicie przez nią elektronów. Po przyłożeniu napięcia (usypaniu wzgórza, po którego zboczu cząstki muszą się zsuwać) elektrony zostają zebrane i można je zliczyć, na przykład przez dokonanie pomiaru całkowitego ładunku elektrycznego. Możliwe jest też zliczanie fotonów emitowanych w chwili, gdy elektrony są ponownie wychwytywane przez atomy. ATLAS robi to wszystko za pomocą około 100 milionów różnych czujników, co czyni go czymś w rodzaju aparatu cyfrowego z matrycą wielkości 100 megapikseli, zdolnego wykonywać w każdej sekundzie 40 milionów zdjęć. W 3D. Cząstek subatomowych. Taka technologia była potrzebna, aby dokonać odkrycia bozonu Higgsa.

Nietypowy aparat cyfrowy

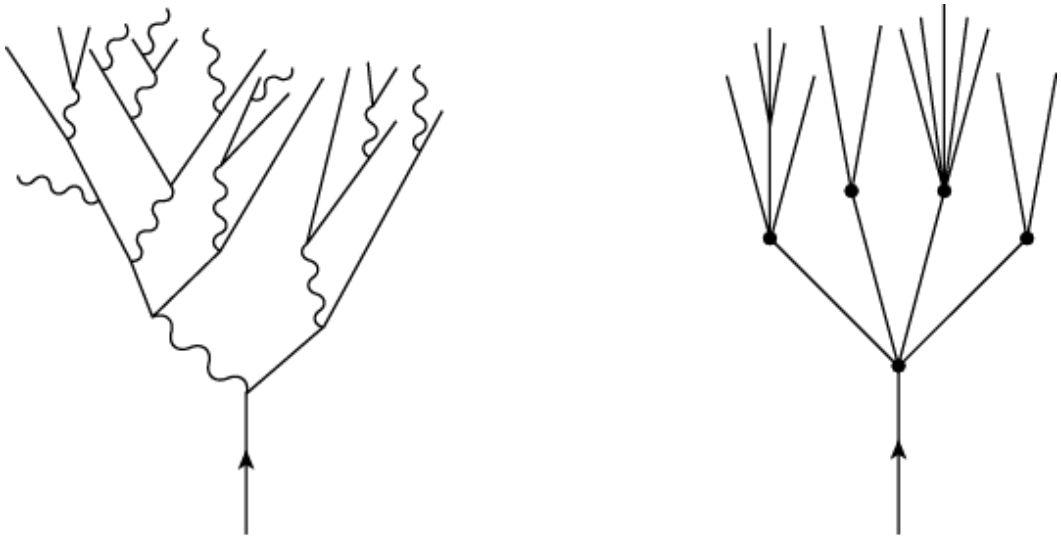
ATLAS ma dwa główne komponenty: detektory śladowe, które dokonują pomiaru cząstek przemieszczających się w ich pobliżu, oraz kalorymetry, które zatrzymują cząstki.

Na pierwszej linii znajdują się detektory śladowe, które w nowoczesnej aparaturze są na ogół cienkimi warstwami krzemu, precyzyjnie podzielonymi na piksele, ułożonymi koncentrycznie wokół miejsca, w którym dochodzi do zderzenia. Kiedy naładowana cząstka, powstała w wyniku zderzenia, przechodzi przez te warstwy krzemu, wytwarza drobny sygnał w każdym pikselu, który znajduje na swej drodze. Sygnały rejestrowane w kolejnych warstwach są niczym ślad z okruszków chleba, umożliwiający rekonstrukcję toru cząstki. Żeby badacze mogli zebrać maksymalnie dużo informacji, pierwsze warstwy znajdują się bardzo blisko punktu zderzenia – w odległości mniej więcej 3 centymetrów. Cały detektor śladowy tkwi wewnątrz ogromnego magnesu, ukształtowanego na wzór makaronu rigatoni o średnicy 2,3 metra i długości 5,3 metra. Pole magnetyczne zakrzywia tor ruchu cząstek, jak robi to LHC z rozpędzanymi protonami, a pomiar tego zakrzywienia pozwala wyznaczyć nie tylko kierunek, ale również prędkość (w istocie pęd) naładowanej cząstki.

Na zewnątrz detektora śladowego znajduje się kalorymetr, który służy do pomiaru położenia cząstki i jej całkowitej energii, zamieniając całość tej energii w zbiór zjonizowanych elektronów. Niestety, w wyniku jonizacji elektronów cząstki nie tracą za wiele energii, toteż mogą poruszać się przez wiele kilometrów, zanim w końcu się zatrzymają. Z całą pewnością nie mamy wystarczająco dużego detektora, aby na to pozwolić! Aby przyspieszyć proces pomiaru, musimy sprawić, że stworzą one coś na kształt „deszczu cząstek”: zamienimy jedną cząstkę o dużej energii na wiele cząstek o mniejszej energii, na tyle małej, że uda się je zatrzymać w niewielkiej odległości od zderzenia. W kalorymetrach osiąga się to przez naprzemienne ułożenie warstw detektora i warstw gęstego pochłaniacza, w którego roli może występować wiele substancji,

od miedzi po żelazo, ołów, a nawet zubożony uran. To właśnie od tego pochłaniacza zaczyna się deszcz cząstek.

Pierwsze cząstki zatrzymywane przez kalorymetr to elektrony i fotony. Kiedy przechodzą one przez gęsty pochłaniacz, wchodzą w oddziaływanie z polem elektrycznym atomów tej substancji, w wyniku czego elektron może wyemitować wysokoenergetyczny foton. Zjawisko to jest łudząco podobne do promieniowania synchrotronowego w LHC. Foton może przekształcić się w elektron i pozyton. Cząstki te mogą wyemitować jeszcze więcej fotonów i tak dalej. Wygląda to trochę jak sztuczne ognie – pojedyncza cząstka, od której wszystko się zaczyna, szybko zamienia się w „elektromagnetyczny deszcz" dziesiątek, setek cząstek o niższej energii, fotonów, elektronów i pozytonów, które można zatrzymać i zmierzyć w detektorze o grubości zaledwie kilku centymetrów.

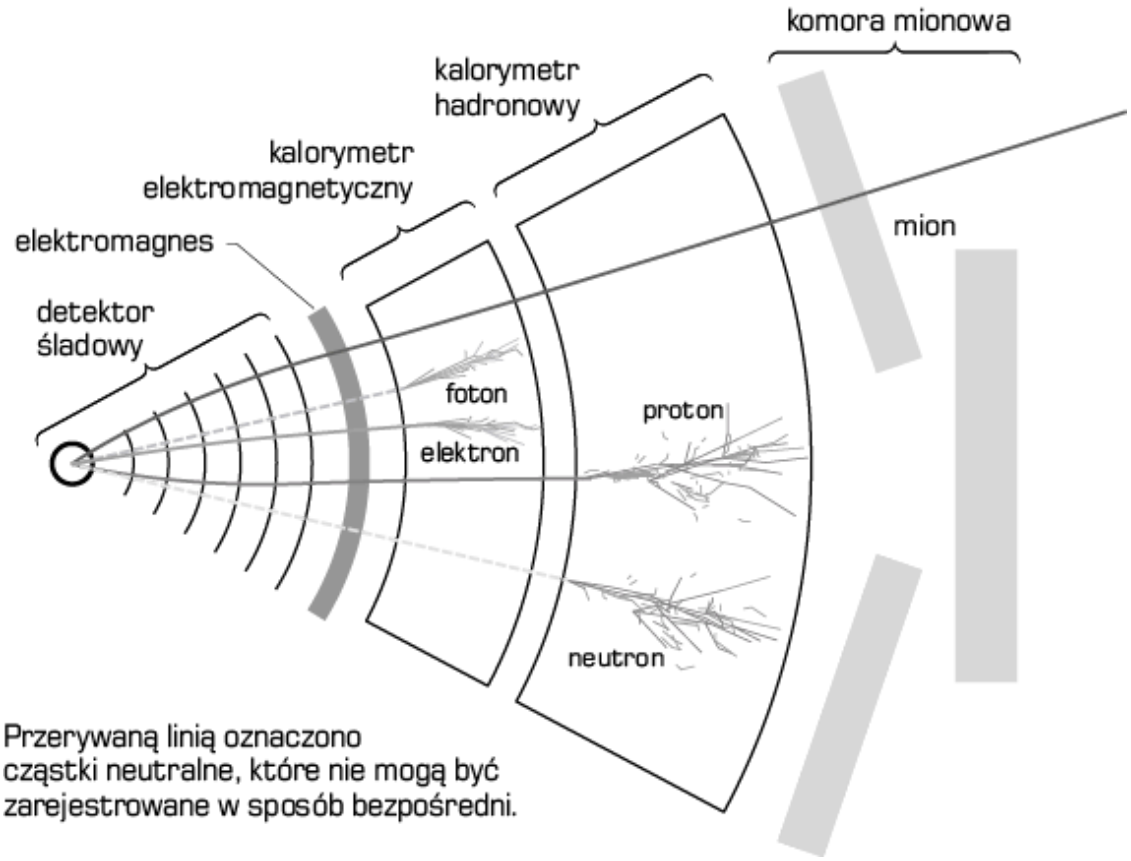


Elektromagnetyczny (po lewej) i hadronowy (po prawej) deszcz cząstek w kalorymetrze

Jest mało prawdopodobne, aby fotony zostały wyemitowane przez jakąkolwiek cząstkę cięższą od elektronu – podobnie jak w wypadku promieniowania synchrotronowego, prawdopodobieństwo emisji fotonu jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi masy cząstki. Wszystkie hadrony są za ciężkie, aby zapoczątkować

elektromagnetyczny deszcz cząstek, toteż trzeba zatrzymać je w inny sposób: uderzenie w jądro atomowe pochłaniacza wywołuje „hadronowy deszcz cząstek". Zderzenie tego typu prowadzi do oddziaływania silnego, jakie opisałem w rozdziale 4 – wybijane są kwarki i gluony, które ostatecznie zostają związane w garstkę nowych hadronów. Ponieważ jądro jest tak małe, oddziaływania tego typu zachodzą rzadziej niż oddziaływanie elektromagnetyczne z udziałem elektronów i fotonów. Trudniej zainicjować hadronowy deszcz cząstek. W celu wyłapania wszystkich hadronów kalorymetr eksperymentu ATLAS ma grubość około 2,5 metra.

Zostają jeszcze miony. Cząstki te są mniej więcej dwieście razy cięższe od elektronu, a więc nie inicjują elektromagnetycznego deszczu cząstek. Nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych, toteż nie wywołują też hadronowego deszczu. Innymi słowy, są naprawdę trudne do zatrzymania. Na zewnątrz kalorymetru instaluje się drugi detektor śladowy, którego zadaniem jest wykonanie pomiaru przelatujących mionów, uciekających w świat, aby gdzieś tam, daleko, ulec rozpadowi. Miony wytworzone w zderzeniach promieniowania kosmicznego z cząstkami powietrza mogą przebyć całą grubość atmosfery, a potem jeszcze 100 metrów skał i są wychwytywane przez detektory LHC. Pierwsze zadanie, nad którym pracowałem w CERN w 2009 roku, polegało na dokonywaniu za pomocą detektora CMS pomiarów pewnych własności tychże mionów kosmicznego promieniowania, zanim LHC został uruchomiony – jakkolwiek dziwnie może to zabrzmieć, do pomiarów promieniowania kosmicznego wykorzystuje się detektor zakopany głęboko pod ziemią!



Jak różne cząstki wyglądają i są rejestrowane w detektorze takim jak ATLAS.

Takie są elementy składowe każdego detektora cząstek, który ma ogólne zastosowania. Jest system śledzenia cząstek w bezpośrednim otoczeniu miejsca zderzenia, z wieloma cienkimi warstwami detektorów, których zadaniem jest śledzenie toru cząstek bez zakłócania ich ruchu. Jest kalorymetr elektromagnetyczny, którego rolą jest zainicjowanie i zarejestrowanie deszczu elektronów i fotonów. Jest też nieco dalej większy kalorymetr hadronowy, mający wychwycić deszcz hadronów. Na koniec jest jeszcze jeden detektor śledzący, który ma za zadanie zarejestrować miony opuszczające miejsce zderzenia. ATLAS mieści wszystkie te komponenty w cylindrycznym z grubsza detektorze o średnicy 25 metrów i długości 45 metrów, którego różne składowe zbierają informacje o wszystkich typach powstających cząstek, ich energii i kierunku ruchu.

W sercu ATLAS-a zderzenia zachodzą 40 milionów razy na sekundę. Mówiąc inaczej, rozdziela je przerwa trwająca 25 nanosekund. Powstające w zderzeniach cząstki niemal bez wyjątku poruszają się z prędkościami bardzo bliskimi prędkości światła, lecz nawet w takiej prędkości są w stanie w ciągu 25 nanosekund przebyć odległość około 7,5 metra, czyli nie uda im się nawet wydostać z detektora, zanim podążą za nimi cząstki wytworzone w kolejnej kolizji. Aby zapobiec nakładaniu się na siebie cząstek z następujących po sobie zderzeń, co prowadziłoby do zamazania wyników, cały ATLAS musi być zsynchronizowany z niewiarygodnie dużą precyzją i musi niewiarygodnie szybko zbierać dane o każdym zderzeniu. Większość wyników jest natychmiast odrzucana dzięki mechanizmom, o których wspomniałem w rozdziale 2 – ultraszybkie decyzje podejmowane są na podstawie sygnałów docierających z wybranych punktów detektora. Do późniejszej analizy zachowywanych jest jakieś 1000 wyników zderzeń z każdej sekundy.

Detektory z dodatkowymi korzyściami

Czytając mój opis, można odnieść wrażenie, że zbudowanie detektora cząstek to coś oczywistego. Wcale tak nie jest, rzecz jasna. Każdy kolejny projekt był precyzyjniejszy, bardziej czuły i szybszy od poprzednika. Detektory to jednocześnie prototypy i produkt końcowy. W miarę potrzeb opracowywane są nowe technologie, począwszy od magnesów służących w LHC do zakrzywiania wiązek protonów, przez szybkie układy elektroniczne do kontrolowania detektora, aż po metody obliczeniowe stosowane do obróbki wszystkich pozyskanych danych.

Eksperymenty te urosły do takich rozmiarów, że do ich obsługi potrzeba dosłownie tysięcy ludzi, a i tak stanowią oni tylko ułamek prawdziwej liczby naukowców, inżynierów, techników, konserwatorów i wielu innych osób, które były zaangażowane w projekt od 1992 roku, gdy poczyniono pierwsze plany. Tak duża złożoność i ponoszone koszty oznaczają, że w danej chwili na świecie

jest tylko jeden akcelerator cząstek, który ustanawia rekordy uzyskiwanych energii. CERN szacuje pełny koszt LHC na około 4,2 miliarda funtów brytyjskich, ale kwota ta była rozłożona na wiele krajów i wiele lat. Dla porównania Londyn wydał mniej więcej dwa razy tyle na organizację igrzysk olimpijskich w 2012 roku. Tak więc LHC jest kosztownym przedsięwzięciem, ale można to powiedzieć o wielu dużych projektach, a ten będzie zajmował wiodącą pozycję w badaniach fizyki cząstek jeszcze przez kilka dekad.

Mimo to często jesteśmy pytani, całkiem słusznie, jak uzasadnić wydawanie pieniędzy na badania spraw tak niewyobrażalnie małych i tak odległych, zdawałoby się, od codziennego życia. Sądzę, że poszerzenie wiedzy o Wszechświecie, o jego początkach i jego przyszłości, *jest wartością*, którą dzięki tym badaniom pozyskujemy. Wymierne i natychmiastowe korzyści przynoszą też technologie, które przy okazji zostały wynalezione. Od jakiegoś czasu powszechnym elementem obrazowania w medycynie są detektory cząstek, od prześwietleń rentgenowskich po skanowanie MRI i PET. Na całym świecie akceleratory cząstek wykorzystuje się w terapii protonowej do niszczenia nowotworów złośliwych. Zastosowania poza laboratorium badawczym znalazły też wyspecjalizowane układy elektroniczne i nowe metody obliczeniowe – ogólnoświatowa sieć Internet i przetwarzanie siatkowe. Praca nad nowatorskimi zagadnieniami naukowymi w sposób konieczny wiąże się z rozwijaniem głębszego pojmowania mechanizmów działania Wszechświata i technologii pozwalających testować formułowane idee. Po wielekroć udowodniono, że inwestowanie w badania podstawowe tego rodzaju zwraca się w postaci niezliczonych dodatkowych korzyści; po prostu nie zawsze można przewidzieć, co zostanie odkryte lub gdzie korzyści wystąpią.

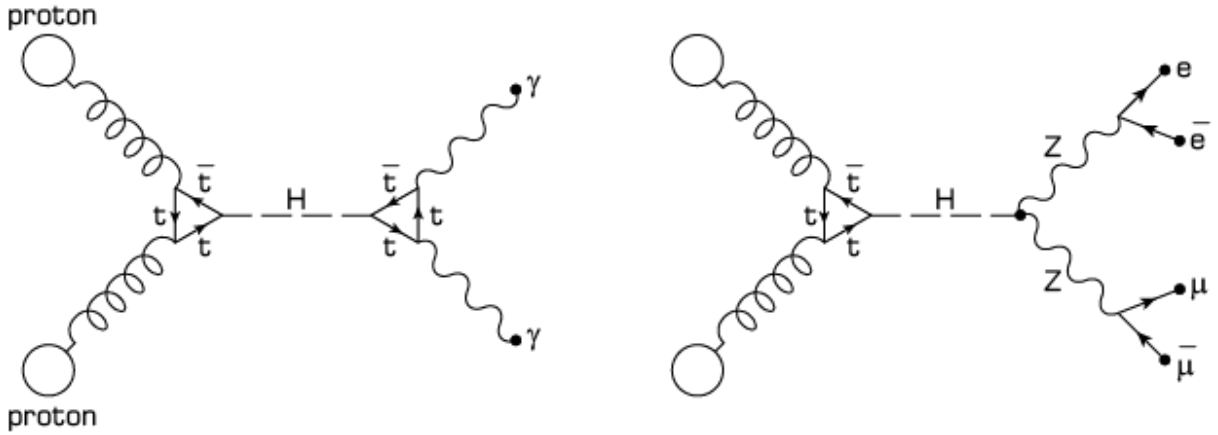
Co można robić z najpotężniejszym akceleratorem cząstek na świecie

Jednym z pierwszych celów stawianych przed LHC było odkrycie istnienia bozonu Higgsa (lub jednoznaczne wykluczenie jego istnienia). Znalezienie tej cząstki dowiodłoby słuszności teorii oddziaływań elektrosłabych, stanowiącej newralgiczny element Modelu Standardowego. Od sformułowania modelu do odkrycia upłynęły jednak 44 lata. Zajęło to tyle czasu, ponieważ warunkiem koniecznym powodzenia było osiągnięcie ogromnego postępu technologicznego, pozwalającego zbudować taki akcelerator jak LHC oraz takie detektory cząstek jak ATLAS lub CMS. Kiedy powstały potrzebne instrumenty, można było rozpocząć poszukiwania.

Jak pisałem w poprzednim rozdziale, bozon Higgsa wygląda na coś bardzo osobliwego: zmarszczkę w polu, które wypełnia energią cały Wszechświat. Punkt widzenia eksperymentatora jest jednak bardziej pragmatyczny – bozon Higgsa to cząstka i powinniśmy móc wytworzyć ją w LHC. Jeśli już uda nam się ją wyprodukować, to dojdzie do jej rozpadu na składniki, które będziemy mogli zarejestrować. Trzeba po prostu zabrać się do roboty i we wszystkich zebranych danych doszukać się sygnatury tych rozpadów.

Teoria powiedziała nam, jak często LHC byłby zdolny do wytworzenia bozonu Higgsa – mniej więcej raz na 10 miliardów zderzeń. Znalezienie tak sporadycznie występującego zjawiska naprawdę było niczym szukanie igły w stogu siana... i to w sytuacji, gdy nie ma pewności, że igła w ogóle się tam znajduje. Dla porównania szansa na główną wygraną w losowaniu narodowej loterii w Wielkiej Brytanii jest jak jeden do 45 milionów. Jeżeli zakupię jeden kupon na każde z dwóch losowań w tygodniu, mogę liczyć na wygraną średnio raz na 430 000 lat. Prawdopodobieństwo wytworzenia bozonu Higgsa jest 240 razy mniejsze, zatem zderzanie dwóch protonów tygodniowo nie zda egzaminu – to dlatego w LHC dochodzi do 40 milionów zderzeń protonów co sekundę. I zderzają się nie tylko pojedyncze protony, ale wiązki zawierające miliardy protonów. Oznacza to, że w każdym z tych zachodzących w każdej sekundzie 40 milionów zjawisk, gdy przecinają się trajektorie wiązek protonów, może się przytrafić od 1 do 30 zderzeń. Każde z tych przecięć trajektorii wiązek, w których może dochodzić do wielu zderzeń, nazywamy „zdarzeniem”. Gdzieś w natłoku wszystkich tych

zdarzeń, w całym tym bałaganie, mniej więcej raz na cztery minuty będzie pojawiać się bozon Higgsa. Teoria powiedziała nam również, jak powinien przebiegać rozpad bozonu Higgsa – na dowolną cząstkę obdarzoną masą. Faktycznego odkrycia dokonano dzięki szukaniu dwóch różnych procesów. W pierwszym bozon Higgsa rozpada się na dwa bozony Z, które później przekształcają się w elektrony i antyelektrony lub miony i antymiony. W drugim rozpada się on na dwa fotony. Oto diagramy obrazujące oba procesy – jeśli zastanawiacie się, jakim sposobem bezmasowy foton może oddziaływać z bozonem Higgsa, wyjaśniam, że dzieje się to za pośrednictwem pętli:



Diagramy Feynmana dla sygnału Higgsa w LHC

Te dwa różne rozpady dają dwie odmienne sygnatury w detektorze i szukano ich niezależnie. Posłużę się przykładem z dwoma fotonami, aby pokazać, jak prowadzono poszukiwania. Na początek z całego zbioru danych wybierano te zdarzenia, w których rejestrowano dwa fotony. Było ich wiele, ponieważ istnieje więcej niż jeden sposób na wytworzenie dwóch fotonów, na przykład po jednym fotonie emitują kwark i antykwark:

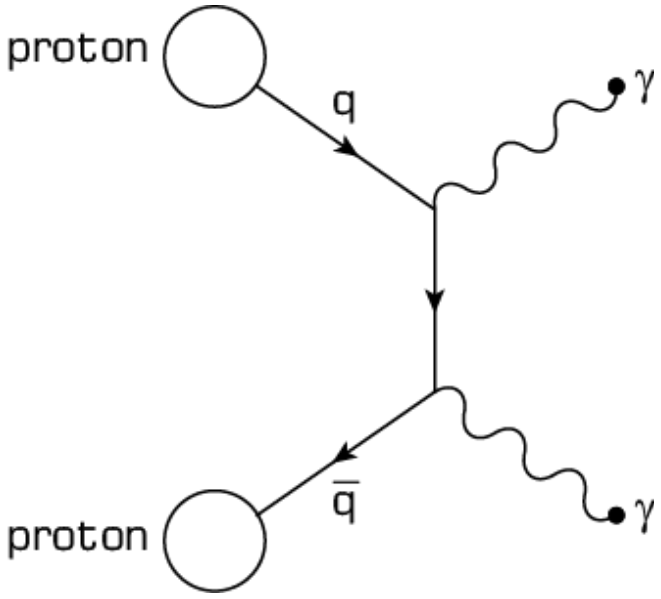
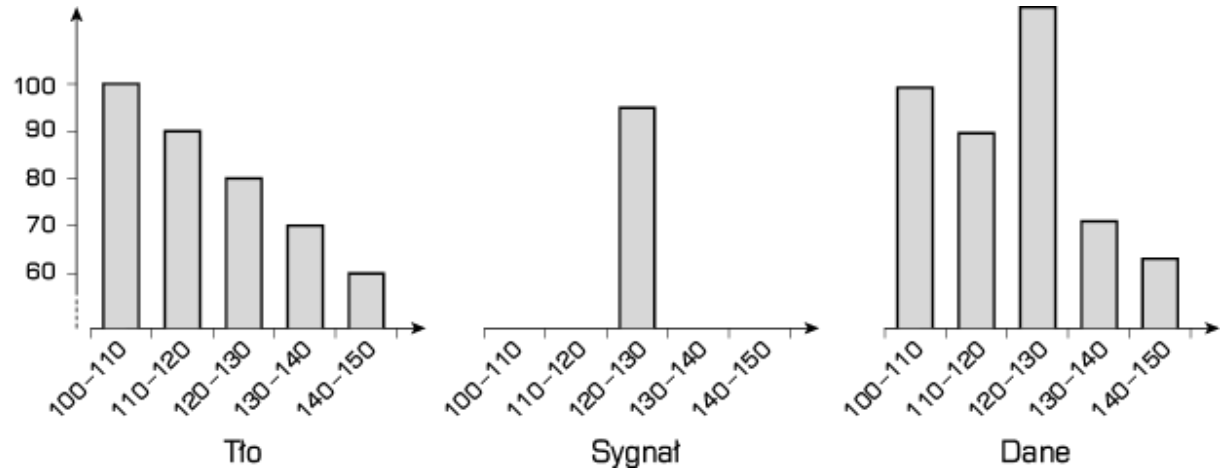


Diagram Feynmana dla jednego z sygnałów, będących głównym tłem dla sygnału bozonu Higgsa w kanale dwufotonowym

To, co imituje sygnał bozonu Higgsa, nazywane jest tłem. Oddzielenie sygnału od tła było głównym zadaniem. Oto pewien bardzo użyteczny fakt: jeśli dokonamy precyzyjnych pomiarów fotonów i dodamy ich energię, możemy wyznaczyć energię ciała, które przyczyniło się do ich powstania. W wypadku zdarzeń tła będzie to zupełnie przypadkowa energia dwóch kwarków wybitych z protonu. Niskoenergetyczne kwarki występują dość powszechnie, kwarki wysokoenergetyczne mniej, lecz niemal każde zderzenie będzie inne. W efekcie zdarzenia z autentycznym sygnałem energia dwóch fotonów będzie się zawsze sumować do tego samego wyniku: masy bozonu Higgsa.

Podstawowym narzędziem jest więc histogram, który składa się po prostu z szeregu słupków, nazywanych „binami". Powiedzmy, że mamy histogram z pięcioma binami, odpowiadającymi przedziałom energii 100–110 GeV, 110–120 GeV, 120–130 GeV, 130–140 GeV i 140–150 GeV. Kiedy trafimy na zdarzenie z dwoma fotonami, dodajemy ich energię i otrzymujemy wynik, 105 GeV, licznik dla pierwszego binu więc przesuwamy o jeden w górę. Następne zdarzenie z dwoma fotonami, 129 GeV, powoduje, że przesuwamy

licznik w górę dla trzeciego binu. 112 GeV, drugi bin, i tak dalej. Końcowy wynik jest sumą zliczeń w poszczególnych binach. Jest bardziej prawdopodobne, iż tło da niższe energie niż wysokie, toteż rozkład energii na poszczególne biny może wyglądać na przykład tak: 101 w pierwszym binie, 93, 78, 72 i 64 w ostatnim, który odpowiada energii 140–150 GeV. Im wyższej energii odpowiada bin, tym mniej zliczeń.



Przykład tego, w jaki sposób tło i sygnał mogą się sumować na jednym histogramie

Sygnał bozonu Higgsa – jakikolwiek by był – będzie przypisany do jednego binu. Powiedzmy, że bozon Higgsa ma masę 125 GeV, zatem każde zdarzenie zawierające rozpad bozonu Higgsa na dwa fotony znajdzie się w binie odpowiadającym 120–130 GeV. Liczba zdarzeń z sygnałem mogłaby wyglądać dla kolejnych binów następująco: 0, 0, 42, 0, 0. W pozyskiwanych danych przez cały rok zdarzenia zawierające sygnał i tło w sposób przypadkowy składają się na łączny rezultat: 101, 93, 120, 72, 64. Środkowy bin zawiera więcej zliczeń, niż moglibyśmy się spodziewać po samych zdarzeniach z sygnałami tła. Taki garb, podniesiony poziom zliczeń w stale malejącym rozkładzie, jest oczywistym znakiem odkrycia. Niestety, w rzeczywistości garby nigdy nie były tak oczywiste! Teoria nie mówiła nam jednego: jaka jest masa bozonu Higgsa. Nie

wiedzieliśmy, gdzie spodziewać się garbu. Tak więc sieć musiała być zarzucona możliwie najszerzej.

Polowanie na garb

Dość często jestem pytany, jak to jest pracować w LHC. Czy każdy z nas dostaje trochę czasu na prowadzenie własnych eksperymentów z wykorzystaniem akceleratora? Czy może każdemu przydziela się fragment danych do opracowania? Jak można wykonywać taką pracę, jeśli mieszka się w Londynie?

Kiedy w LHC zderzane są protony, co dzieje się niemal 24 godziny na dobę przez mniej więcej sześć miesięcy w roku, każdy eksperyment obsługiwany jest na miejscu, w sterowni, przez mały zespół (liczący mniej niż dziesięć osób), który ma zadbać, aby wszystko działało jak należy: dane są rejestrowane, detektor nie ma kłopotów i tak dalej. Kilku ekspertów utrzymuje kontakt telefoniczny, na wypadek, gdyby coś nie funkcjonowało jak należy, jednak na ogół nic złego się nie dzieje. Zwykle kilka razy dziennie następuje przerwa w pracy akceleratora, w trakcie której uzupełniane są wiązki protonów. Są też dłuższe przerwy techniczne (trwające około tygodnia). Zimą, gdy cena energii elektrycznej jest za wysoka, aby zasilać akcelerator, detektory i tunel są dostępne i przeprowadza się naprawy lub renowacje – nikomu nie wolno tam wchodzić, gdy LHC pracuje!

Dane z zarejestrowanych zdarzeń są później przetwarzane. W tym celu stosuje się najświeższe kalibracje i metody rekonstrukcji. Danych dotyczących każdego zdarzenia (mogących odzwierciedlać wiele zderzeń zachodzących w tym samym czasie) raczej nie wykorzystuje się do stworzenia obrazu tego, co zaszło w detektorze. Zamiast tego sporządzana jest lista obiektów wraz z ich własnościami: elektron o energii 45 GeV pod kątem 15 stopni, dżet o energii 218 GeV pod kątem 75 stopni, mion o energii 15 GeV pod kątem 230 stopni, i tak dalej. Wszystkie przetworzone zdarzenia są następnie udostępniane do analizy wszystkim naukowcom

zatrudnionym w danym eksperymencie, którzy dzielą się na grupy zainteresowane pomiarem poszczególnych wielkości. Kopie danych są rozsyłane po całym świecie, otrzymują je współpracujące z LHC uniwersytety i instytuty. Ponieważ analiza przeprowadzana jest komputerowo, można robić to w dowolnym miejscu – może to być CERN, mój gabinet w Londynie, a równie dobrze zacieniony kącik na plaży (z dobrym połączeniem wi-fi). Przeprowadzanie analizy na miejscu, w CERN, ma oczywiste zalety i regularnie tam jeżdżę, ponieważ zawsze jest tam wielu ludzi, łatwiej porozmawiać przy kawie i poznać najświeższe wieści. Przy każdej analizie może pracować od garstki po setkę badaczy i mogą oni przebywać niemal w dowolnym miejscu na świecie.

W priorytetowych analizach, takich jak poszukiwanie dwufotonowego Higgsa, zaangażowanych było wiele osób (pracowałem wówczas przy innej analizie, ale odegrałem pewną rolę, dostarczając przetworzone dane). Ludzie ci nie siedzieli jednak z założonymi rękami, czekając na napływające dane. Jednym z głównych zadań naukowca zajmującego się dzisiaj fizyką eksperymentalną jest projektowanie nowych i lepszych algorytmów, narzędzi i instrukcji służących głębszemu rozumieniu i kalibrowaniu detektora, co przełoży się na sprawniejsze przekopywanie się przez góry danych, wydobywanie subtelnych różnic między spodziewanym wyglądem sygnału a tłem, umożliwiając dokonywanie pomiarów i odkryć. Na tym polega zasadnicze znaczenie teoretycznych przewidywań, tych precyzyjnych obliczeń dotyczących tego, co dzieje się w zderzeniu zachodzącym w LHC, o których wspominałem w rozdziale 4. Bez tych przewidywań, wskazujących, czego mamy się spodziewać, znacznie trudniej byłoby stworzyć algorytm pozwalający wyodrębnić potencjalnie nowy sygnał.

Dzień za dniem przez większość czasu ślęczymy nad tym algorytmem i analizą danych, zajmując niszę na przecięciu badań podstawowych i „analizy danych nieuporządkowanych". Mieliśmy do czynienia z „big data" na długo przed tym, zanim termin ten stał się wszechobecny. Wykorzystujemy wszystko, od prostych metod statystycznych aż po najnowsze narzędzia uczenia maszynowego,

aby na bazie teoretycznych przewidywań przygotować komputery do klasyfikowania zdarzeń i oddzielania sygnału od tła.

W poszukiwaniach cząstki Higgsa dane były przetwarzane szybko i stale aktualizowano informacje związane z wymownym garbem, którego wypatrywano. Aby uniknąć tendencyjności, wszelkie poszukiwania tego typu prowadzone są „na ślepo": obszar, gdzie może znajdować się potencjalny sygnał, jest usuwany z danych, zanim wszystkie procedury analizy zostaną zakończone. Dopiero wtedy „otwieramy pudełko" i sprawdzamy, czy jest tam garb.

Po wyczerpaniu wszelkich sztuczek analizy danych wszystko sprowadza się do liczb: trzeba zebrać tak dużo danych, żeby garb był nie do przeoczenia. Ponieważ zderzenia są procesami kwantowymi, nie wiemy, kiedy dokładnie powstanie bozon Higgsa. Czasem zdarzenia z sygnałami tła przypadkowo nakładają się na siebie, tworząc coś w rodzaju garbu. To trochę jak rzucanie monetą i uzyskanie pięciu reszek z rzędu – może się zdarzyć i wcale nie oznacza, że moneta jest oszukana. Trzeba rzucać dalej i po jakimś czasie liczba wypadających reszek zostanie zrównoważona przez liczbę wypadających orłów. Zbierzcie więcej danych i przypadkowe garby ulegną wygładzeniu.

Wszystkie z wyjątkiem jednego. W 2011 roku zebrane dane wskazywały na istnienie skupiska zdarzeń dla masy 125 GeV. Wartość ta mieściła się w zakresie przewidywanej masy bozonu Higgsa, ale nie była na tyle znacząca, aby formułować jakiekolwiek wnioski. Zgodnie z wyświechtanym stwierdzeniem – trzeba było więcej danych. Po zimowej przerwie dane te pozyskano i szybko poddano analizie. Do 4 lipca 2012 roku oba zespoły, detektorów ATLAS i SMC, były gotowe ujawnić, co znalazły. Seminarium zaplanowano na godzinę 9 rano w CERN (godzina 8 rano w Wielkiej Brytanii, północ w Kalifornii) i zamierzano transmitować na żywo na cały świat. Ludzie spędzili noc przed budynkiem audytorium, żeby mieć pewność, że dostaną się do środka. Większość, w tym ja, oglądała transmisję w Internecie, na jednym z przeciążonych portali.

Statystyka, cholerna statystyka i bozon Higgsa

Zidentyfikowanie prawdziwego garbu pośród garbów fałszywych wymaga odwołania się do potęgi statystyki. Na początek musimy wiedzieć, jak wiele zdarzeń powinno trafić w dane miejsce. To właśnie tu teoretyczne przewidywania, które mówią nam, czego się spodziewać, odgrywają zasadniczą rolę – jeśli nie wiemy, co jest normalne, znacznie trudniej dostrzec coś niezwykłego. Często nachodzi mnie taka refleksja, gdy słyszę, jak politycy lub dziennikarze powołują się na dane statystyczne bez nakreślenia odpowiedniego kontekstu. „Według nowych badań, w tym miesiącu trzydziestu ludzi będzie miało atak serca!" Czy to dużo? Ilu ludzi normalnie ma atak serca? Aby liczba ta miała dla nas sens, musimy wiedzieć, czego się spodziewać.

Następnie należy uwzględnić losowość mechaniki kwantowej. Powiedzmy, że bierzemy jeden wycinek danych i sporządzamy dla nich histogram, który opisałem wcześniej. Liczba zdarzeń przypisanych poszczególnym przedziałom może wyglądać tak: 101, 93, 86, 72, 64. Później sięgamy po drugi wycinek danych i możemy uzyskać: 103, 89, 85, 73, 62. Nie zawsze dostajemy te same liczby dla każdego binu i nie zawsze dostajemy właśnie te, których byśmy się spodziewali. Po sporządzeniu histogramów dla wielu wycinków danych zapewne okaże się, że za każdym razem uzyskujemy nieco inny wynik – nie ma w tym nic niezwykłego, to tylko skutek tego, że każde zderzenie jest całkowicie przypadkowe. Rzućcie monetą dziesięć razy i sześć razy wypadnie reszka. Rzućcie następne dziesięć razy i teraz dostaniecie reszkę tylko trzy razy – to ten sam efekt. Tak więc każdemu binowi przyporządkowujemy „niepewność statystyczną", która odzwierciedla fakt, że równie dobrze mogliśmy dokonać pomiaru jakiejś wielkości z drobnym przesunięciem w tę lub tamtą stronę, czysto przez przypadek. Niepewność tę wybiera się tak, aby pokrywała 68 procent zakresu wartości, po których moglibyśmy się spodziewać, iż zaistniały wskutek losowości. Oznacza się ją σ (sigma).

Jest jeszcze niepewność systematyczna, która dodaje się do σ, zwiększając zakres spodziewanych wartości. Oszacowywanie tych niepewności zwykle pochłania 90 procent czasu pracy przy każdej analizie danych i nakazuje przyjrzeć się wielu różnym zjawiskom. Nigdy nie uda się skalibrować detektora absolutnie idealnie, toteż zawsze istnieje jakaś niepewność w odniesieniu do mierzonych energii fotonów. Jeżeli zastosujemy inny model teoretyczny, możemy uzyskać trochę odmienne przewidywanie na temat tego, jak wiele zdarzeń powinien wyławiać nasz algorytm. I tak dalej. Zapis seminarium z lipca 2012 roku wciąż jest dostępny w sieci. Każdy może się przekonać, ile czasu poświęcono na dyskusję na temat szczegółów związanych z niepewnościami systematycznymi i w jaki sposób wpływają one na polowanie na garb.

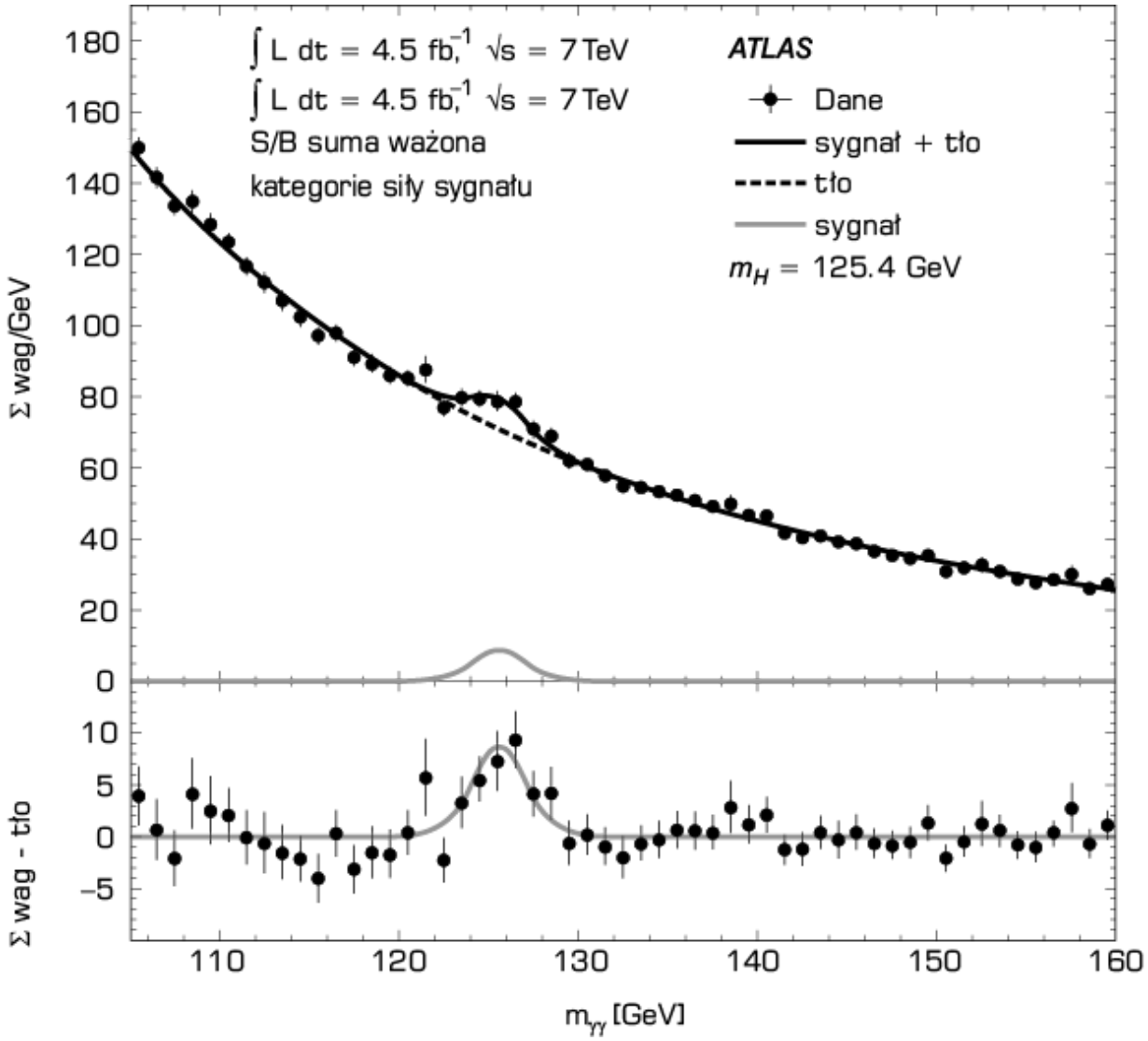
Na koniec mamy spodziewaną liczbę zdarzeń tła, jak też rzeczywistą liczbę wszystkich zdarzeń zapisanych w danych. Jeżeli rzeczywista liczba zdarzeń w jednym lub więcej binów wykracza o wartość 5σ poza oczekiwania, czyli jest pięciokrotnie wyższa niż łączna wartość niepewności statystycznej i systemowej, to stało się tam coś interesującego. Szansa na to, aby sygnały tła przypadkowo wytworzyły tak ogromne przesunięcie, jest jak 1 do 3,5 miliona – co jest równoważne sytuacji, gdy rzucamy monetą i 22 razy z rzędu wypada reszka. Tak nakreśliliśmy granicę, aby mieć pewność, że garb jest autentyczny.

Takie wieści 4 lipca 2012 roku ogłosiły światu zespoły eksperymentów ATLAS i CMS. Każdy zespół szukał sygnatury bozonu Higgsa w zdarzeniach z udziałem dwu fotonów, a także w zdarzeniach z udziałem dwóch bozonów Z. Garb pojawił się w analizie dla obu rodzajów zdarzeń i... dla tej samej masy, około 125 GeV. Połączenie obu garbów pozwoliło przeskoczyć magiczną granicę 5_{σ}. Do tej pory oba eksperymenty prowadzono niezależnie od siebie, można więc było niezależnie weryfikować każdy wynik – w obu wykazano istnienie garbu dla tej samej masy, 125 GeV. W końcu zatem znaleziono bozon Higgsa, co audytorium powitało burzą oklasków.

Odkrycie bozonu Higgsa uzupełniło Model Standardowy. W 2013 roku LHC został na dwa lata wyłączony celem przeprowadzenia

modernizacji. Do tego czasu wykorzystywał tylko nieco ponad połowę swojej mocy (7 TeV w latach 2010–2011, 8 TeV w 2012 roku). Ostrożność była podyktowana wydarzeniem z 2008 roku. Wówczas to, gdy włączono LHC po raz pierwszy, doszło do przegrzania jednego z magnesów. Ciekły hel, stosowany do chłodzenia magnesów, zagotował się i gwałtownie zwiększył objętość, doprowadzając do poważnych zniszczeń, których naprawa pochłonęła cały rok.

W 2015 roku modernizacja została zakończona i LHC pracuje w zakresie energii 13 TeV, o której wspominałem wcześniej. Możliwe jest poszerzenie tego zakresu do 14 TeV, lecz potrzebnych będzie dużo nowych magnesów. Obecnie zbieramy dane ze zderzeń zachodzących w energiach dużo wyższych niż kiedykolwiek przedtem w historii, a lista obiektów, które mogą się objawić, jest długa. Wytłumaczę, czym są te obiekty, po przybliżeniu najmniej znanego członka Modelu Standardowego, który sam również ma swoje niespodzianki. Przed państwem: neutrino.



Garb bozonu Higgsa w zdarzeniach z udziałem dwóch fotonów, powstałych w zderzeniach rejestrowanych przez ATLAS

ROZDZIAŁ 8

KAŻDE NEUTRINO MA SWÓJ DZIEŃ

We Wszechświecie jest mnóstwo gwiazd – tylko w naszej Galaktyce mamy ich ponad 100 miliardów. To kolejna z tych liczb, które trudno sobie wyobrazić, zatem spójrzmy na to inaczej. Na Ziemi jest około 7 miliardów ludzi i gdyby każdy człowiek na planecie liczył jedną gwiazdę w każdej sekundzie, policzenie każdej wchodzącej w skład Drogi Mlecznej zajęłoby tylko dwie i pół minuty. Jednak to tylko jedna z miliardów galaktyk, jakie znajdują się w rozciągającej się wokół nas przestrzeni. Jeżeli każda z tych 7 miliardów osób będzie kontynuować liczenie gwiazd w tempie jednej na sekundę, trzeba będzie 40 000 lat, żeby policzyć wszystkie gwiazdy w widzialnym Wszechświecie. To naprawdę bardzo dużo.

Gwiazdy, jak wszystko inne, zbudowane są z atomów. Całego mnóstwa atomów. W jednej kropli deszczu jest tyle atomów, co gwiazd we Wszechświecie, zatem jeżeli każdy człowiek na Ziemi będzie liczył w tempie jednego atomu na sekundę, minie 40 000 lat, zanim oszacujemy wszystkie atomy w zaledwie jednej kropli deszczu. Powiększmy to do liczby atomów w szklance wody, albo do całej Ziemi, albo do wszystkich gwiazd we Wszechświecie... to mnóstwo elektronów, kwarków górnych i kwarków dolnych. We Wszechświecie jest oszałamiająco dużo cząstek.

Istnieją jednak takie fermiony, których jest więcej niż wszystkich kwarków i elektronów w każdym atomie w całym Wszechświecie. To neutrina. Ta najbardziej tajemnicza z cząstek ujawniła już pierwszą rysę na Modelu Standardowym i niewykluczone, że stanowi klucz do kilku pytań, na które fizyka nie znalazła jeszcze odpowiedzi.

A szukanie wiedzy na ich temat oznacza pozostawienie LHC daleko w tyle.

Neutrina są wszędzie

Pierwszy neutrino wyobraził sobie w 1930 roku Wolfgang Pauli, który widział w nim sposób na zrównoważenie bilansu energii uwolnionej w rozpadzie beta, nie sądził jednak, by to „małe neutralne coś" faktycznie dało się zmierzyć. Niektórzy z jego współczesnych posunęli się w swoich wątpliwościach dalej i uznali, że nie ma możliwości, by tak dziwna niewykrywalna cząstka w ogóle była realna.

Tym, co czyni neutrina tak trudnymi do zmierzenia, jest fakt, że nie przenoszą one ładunku elektrycznego, zatem nie czują oddziaływania elektromagnetycznego, oddziaływania, którego używamy, by wchodzić w interakcje z otaczającym nas światem i które w ten czy inny sposób wykorzystywane jest w każdym detektorze cząstek. Inaczej mówiąc, my oraz każdy detektor cząstek jesteśmy ślepi na neutrina. Neutrina wchodzą w interakcje tylko z oddziaływaniem słabym, co oznacza, że rzadko w ogóle wchodzą w interakcje, ale ponieważ oddziaływanie słabe jest kluczowe w rozpadzie tak wielu innych cząstek, neutrina wciąż są wytwarzane, i to w ogromnych ilościach.

Wiemy, że było tak w pierwszym ułamku sekundy po Wielkim Wybuchu. Cząstki zderzały się z sobą w wysokich energiach, tworząc ciężkie taony, bozony W i Z, kwarki wysokie i bozony Higgsa. W bardzo gęstym wczesnym Wszechświecie niektóre z tych cząstek mogły szybko spotkać swoje antycząstki i z powrotem zamienić się w bozon. Reszta po ułamku sekundy uległa rozpadowi, a w każdym rozpadzie z udziałem bozonu W ten ostatni mógł podzielić się na naładowany lepton, takie jak mion, i partnerujące mu neutrino. W Wielkim Wybuchu powstały biliony bilionów neutrin, które teraz po prostu dryfują przez Wszechświat.

Dzisiaj istnieje inne źródło neutrin, które nie ma nic wspólnego z Wielkim Wybuchem. Kiedy Wszechświat rozszerzył się i ochłodził, protony i elektrony, które przetrwały, zaczęły tworzyć najbardziej podstawowy atom, wodór. Przez miliony lat niewiele więcej się działo, poza tym, że z wolna swoją pracę wykonywała grawitacja. Wodór zaczął zbierać się w obłoki, a wewnątrz tych obłoków zbijać w gęste skupiska. Ich gęstość rosła i rosła, aż wreszcie dochodziło do zapłonu i gęste skupiska zamieniały się w kulę ognia. Mniej więcej 100 milionów lat po Wielkim Wybuchu powstały pierwsze gwiazdy.

Gwiazdy to gigantyczne reaktory syntezy jądrowej. Siła grawitacji w ich jądrach przeważa nad odpychaniem elektromagnetycznym między protonami, stłaczając je z sobą. Znajdują się tak blisko, że dostają się we władanie oddziaływania silnego, które wiąże je z sobą w nowe jądro atomowe, uwalniając przy tym energię. Gdyby Jowisz był dziesięć razy masywniejszy, on również mógłby zacząć fuzję protonów i mielibyśmy w naszym układzie planetarnym dwie gwiazdy. Jeśli udałoby nam się znaleźć technologię, która umożliwiłaby fuzję tutaj, na Ziemi, bez tych gigantycznych sił grawitacyjnych, mielibyśmy praktycznie niewyczerpane, niezanieczyszczające środowiska źródło energii. Przez lata pojawiła się pewna liczba słynnych prób oszustwa i mistyfikacji, lecz obecnie czołowe międzynarodowe programy badawcze, takie jak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor z siedzibą we Francji), faktycznie mogą znajdować się na dobrej drodze do uczynienia z syntezy jądrowej realnego źródła energii.

Pierwszym rezultatem fuzji jest nowe jądro, zawierające dwa dodatnio naładowane protony, a jak wiadomo, dwie dodatnio naładowane cząstki będą się odpychały. Dlatego jądro będzie bardziej stabilne, jeżeli jeden z tych protonów ulegnie rozpadowi beta, zamieniając się w neutron i uwalniając dodatkową energię w postaci antyelektronu i neutrina elektronowego. Dalsza synteza prowadzi do powstania jądra helu (2 protony, 2 neutrony), następnie litu (3 protony, 5 neutronów) i tak kolejno, aż do żelaza (26 protonów, 30 neutronów) – cały czas uwalniając więcej energii i neutrin. Zatem neutrina wylewają się z gwiazd we wszystkich

kierunkach i w ogromnych ilościach. Nawet mimo dzielących nas od Słońca 150 milionów kilometrów ciało każdego człowieka na Ziemi w każdej sekundzie przenika około 10 bilionów zrodzonych w procesie syntezy neutrin. Kiedy gwiazda eksploduje jako supernowa, dochodzi do lawiny dokonujących się w ostatniej chwili fuzji, produkujących jądra pierwiastków jeszcze cięższych niż żelazo. Te ciężkie pierwiastki rozpraszają się w całej galaktyce, gdzie w końcu tworzą planety takie jak Ziemia. Supernowe mogą stać się najjaśniejszymi obiektami na nocnym niebie, produkując rozbłysk światła jaśniejszy niż cała galaktyka, w której znajdowała się gwiazda. Lecz niezależnie od tego, jak dużo energii zawiera się w tym błysku światła – a jest jej mnóstwo – blisko sto razy więcej energii uwalnia się z każdej supernowej w finalnej powodzi neutrin.

Faktem jest, że neutrina, choć trudne do wykrycia i widmowe, są wszędzie. Ich interakcje i zachowanie miały ogromny wpływ na to, jak kształtował się, a potem ewoluował Wszechświat. Im bardziej Model Standardowy umacniał swoją przydatność w opisie świata subatomowego, tym ważniejsze stawało się pogłębienie naszej wiedzy na temat tych dziwnych cząstek.

Co wiemy o neutrinach

Zacznijmy od tego, co wiadomo o neutrinach w Modelu Standardowym. Występują one w trzech „zapachach”, po jednym na każdy naładowany lepton, jako że w oddziaływaniu słabym są partnerami elektronu, mionu i taonu. Neutrina nie przenoszą ładunku elektrycznego ani kolorowego, oddziałują więc tylko z bozonami W i Z. Wiemy również, że są dużo, dużo lżejsze niż jakikolwiek inny fermion, a Model Standardowy wymaga, żeby w ogóle nie miały masy. Jak większość zjawisk w fizyce cząstek, to również spowodowane jest przez symetrię, zwaną symetrią parzystości.

Wracając do dyskusji z rozdziału 7, przypomnę, że coś jest symetryczne, jeżeli jest niezmienne ze względu na transformację, a transformacja parzystości to po prostu odbicie w lustrze. Wiele

rzeczy wygląda tak samo jak ich odbicie w lustrze: proste kształty, takie jak koła, oraz tak powszednie obiekty, jak piłki, wieżowce i tym podobne. Lecz jest również wiele takich, które nie wyglądają tak samo, a przykład mamy wprost przed sobą: nasza lewa i prawa ręka są swoimi zwierciadlanymi odbiciami. Fizycy używają na określenie symetrii zwierciadlanej nazwy chiralność, od greckiego słowa oznaczającego „rękę". Nasze ręce występują w dwóch „stanach chiralnych" – lewym i prawym – a odbicie, czy też transformacja parzystości, sprawia, że jedna z nich wygląda jak druga.

Ponieważ cząstki są nieskończenie małe, ich zwierciadlane odbicie nie powinno mieć większego znaczenia. Lustrzany obraz nieskończenie małej kropki nadal jest nieskończenie małą kropką. Istnieje jednak pewna własność cząstek, która jeszcze się na stronach tej książki nie pojawiła, a mianowicie spin. Nawet jeśli wydają się one nieskończenie małymi kropkami, cząstki elementarne zachowują się tak, jakby wirowały. Nieskończenie małe wirujące bączki. Wolfgang Pauli zaproponował tę ideę w 1924 roku, po czym w 1928 roku Dirac odkrył swoje równanie, a ono w naturalny sposób zawierało spin (opakowany w wyrażenie ig.d), dowodząc, że to wewnętrzna własność każdego fermionu. Bozony również wirują, i to dwa razy szybciej niż fermiony – wszystkie oprócz bozonu Higgsa, który jest jedyną znaną nam cząstką elementarną pozbawioną spinu.

Spin ma kierunek. Wyciągnijcie prawą rękę, jakbyście zamierzali wymienić z kimś uścisk dłoni, po czym zwińcie palce dłoni w pięść. Jeżeli wyobrazicie sobie swój kciuk jako środek tarczy zegara, to wasze palce owijają się wokół niego w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Powtórzcie to samo z lewą ręką, a palce będą układały się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. W istocie można powiedzieć, że wszystkie zegary są „lewoskrętne". Teraz wyobraźmy sobie, że patrzymy na cząstkę. Jeżeli porusza się w naszym kierunku i wiruje zgodnie z ruchem wskazówek zegara, jest „lewoskrętna", jeżeli wiruje przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, jest „prawoskrętna". Te dwa kierunki wirowania związane są przez transformację parzystości: jeżeli spojrzycie na odbicie normalnego zegara w lustrze, zauważycie, że wskazówki na tarczy

jego obrazu poruszają się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara – zegar stał się „prawoskrętny”.

W odniesieniu do oddziaływania elektromagnetycznego i silnego nie ma to większego znaczenia, ponieważ fotony i gluony wchodzą w interakcje z fermionami wirującymi w obydwu kierunkach. Oddziaływanie słabe jest inne, gdyż bozony W oddziałują tylko z cząstkami lewoskrętnymi. Inny jest również bozon Higgsa: nieustanne wleczenie fermionów w polu Higgsa, które nadaje im masę, sprawia, że wciąż zmieniają stan, przeskakując z lewo- na prawoskrętność i odwrotnie. Oddziaływanie silne i elektromagnetyczne wita cząstki z szeroko otwartymi ramionami, oddziaływanie słabe oferuje nieśmiały leworęczny uścisk dłoni, a pole Higgsa jest towarzyskim wujkiem, który je podrzuca i obraca.

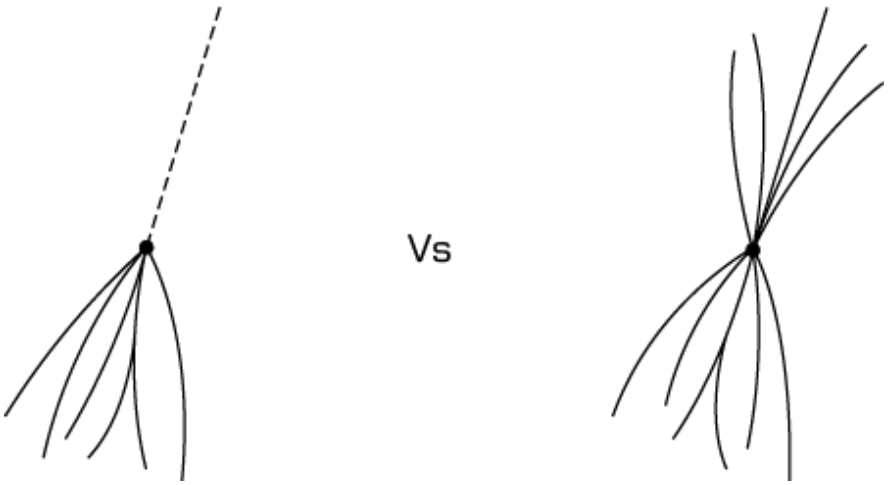
Nie wiemy dokładnie, dlaczego oddziaływanie słabe rozróżnia między cząstkami lewo- i prawoskrętnymi, choć prawdopodobnie właściwa odpowiedź brzmi „bo może”. Symetria chiralna jest możliwa we Wszechświecie, a niemal każda możliwa symetria, którą potrafimy sobie wyobrazić, jest gdzieś realizowana. Symetria chiralna pojawia się w oddziaływaniu słabym. Możemy bardzo dobrze opisać ją w Modelu Standardowym, ale nie znamy jeszcze dobrego wytłumaczenia, dlaczego tak się dzieje.

Natomiast w wypadku neutrin prowadzi to do interesującej sytuacji. Neutrino wchodzi w interakcje jedynie z oddziaływaniem słabym, które z kolei widzi tylko cząstki lewoskrętne. Chcąc oddziaływać z polem Higgsa i nabrać masy, cząstka musi przejawiać obydwie skrętności, jednak neutrino jest tak lekkie, że nie wydaje się, by to robiło. Być może wyjaśnienie kryje się w fakcie, że neutrino prawoskrętne nie istnieje – i tak właśnie zbudowano Model Standardowy: neutrina są bezmasowe i kręcą się tylko w jedną stronę.

Znalezienie neutrin

Warto powiedzieć to jeszcze raz: neutrina bardzo trudno jest zmierzyć. Wydaje się, że nie mają masy, co znaczy, że podróżują z prędkością światła i oddziałują tak rzadko, że przenikają każdy materiał bez dotykania go. Tymczasem jeżeli chcemy wykryć cząstkę i zbadać jej właściwości, cząstka musi oddziaływać, czyli musi w coś uderzyć. Można obliczyć, jak często neutrino wchodzi w interakcje (niezbyt), a więc jak duży musi być detektor, żeby miało ono realną szansę w niego uderzyć. Okazuje się, że jego długość musiałaby przekraczać jeden rok świetlny. Inaczej mówiąc, gdybyśmy wystrzelili neutrino w stronę naszego detektora, musiałby on się rozciągać na odległość równą jednej czwartej drogi do najbliższej gwiazdy, Alfa Centauri, by mieć przynajmniej 50 procent szans na detekcję.

To tylko kolejny sposób wyrażenia tego, że neutrina nadzwyczaj trudno jest wykryć. Kiedy powstają w LHC, w procesie rozpadu cięższych cząstek, ulatują z miejsca zderzenia niezauważone. Niemniej jednak, ponieważ zderzenia na ogół są zbilansowane, pozostawiają one po sobie charakterystyczną sygnaturę. Zasada zachowania pędu mówi nam, że jeśli pewne cząstki oddalają się w jednym kierunku, musi istnieć jedna lub kilka cząstek o takim samym pędzie oddalających się w przeciwnym kierunku. Neutrino pojawia się jako „brakująca energia”: ponieważ go nie wykrywamy, zderzenie wydaje się niezbilansowane. Dokonując pomiarów wszystkiego innego, możemy całkiem dokładnie obliczyć, jak dużo energii ma neutrino, w którym kierunku podróżuje, a także w jaki sposób mogło powstać.



Cząstki opuszczające miejsce zderzenia, w którym powstało niewykryte neutrino (reprezentowane przez linię przerywaną), w porównaniu ze zderzeniem bez neutrin

Jednak brakująca energia nie mówi nam zbyt wiele o samym neutrinie. Ani o tym, którym z trzech możliwych typów mogłoby być (elektronowe, mionowe czy taonowe), ani jak mogłoby się zachowywać. Chcąc poddać neutrina realnym badaniom, musielibyśmy przyłapać je w działaniu, a to już prawdziwy totolotek. Zamiast budować detektor o długości jednego roku świetlnego, żeby zmierzyć jedną taką cząstkę, bazujemy na fakcie, że wokół nas cały czas są ich biliony i w każdej chwili przynajmniej jedna z nich robi coś, co możemy zmierzyć.

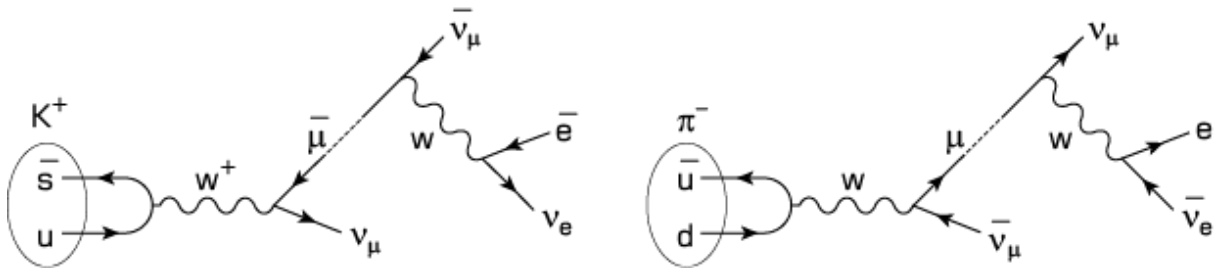
Zatem chcąc dowiedzieć się czegoś o neutrinach, potrzebujemy ich znacznie więcej. Są cztery główne ich wytwórnie, które produkują je w wystarczającej liczbie, pozwalając nam badać cztery rodzaje tych cząstek.

1) Neutrina słoneczne. Najbardziej obfite źródło. To neutrina elektronowe produkowane w zachodzących w samym sercu Słońca procesach syntezy jądrowej.

2) Neutrina z reaktora. Elektrownie jądrowe produkują energię powstałą w wyniku reakcji rozszczepiania dużych niestabilnych jąder atomowych. Na ogół charakteryzują się procesem przeciwnym do syntezy jądrowej w Słońcu, wytwarzając antyneutrina elektronowe. Pierwszej rejestracji tych cząstek dokonali Cowan i Reines w 1956

roku w eksperymencie przeprowadzonym obok reaktora w Karolinie Południowej. Udało im się zarejestrować około trzech neutrin na godzinę (w tym samym czasie dobrze ponad tysiąc milionów milionów milionów cząstek przenikało detektor na wylot).

3) Neutrina atmosferyczne. Kiedy w atmosferę Ziemi uderza wysokoenergetyczne promieniowanie kosmiczne, towarzyszy temu prysznic wyprodukowanych cząstek. Reakcje zachodzą w znacznie wyższych energiach niż procesy jądrowe w Słońcu czy w reaktorach jądrowych, toteż w wyniku słabego rozpadu naładowanych pionów i kaonów powstają niezliczone ilości ciężkich mionów. W efekcie otrzymujemy głównie neutrina mionowe i nieco neutrin elektronowych, na przykład:



Rozpad kaonu i pionu. Mion może przewędrować kilka kilometrów, zanim on również ulegnie rozpadowi.

4) Neutrina w akceleratorze. Stworzenie strumieni rozpędzonych protonów, takich jak strumienie w LHC, i zbombardowanie nimi jakiegoś ciała stałego, imituje zderzenie z promieniowaniem kosmicznym. Powstają piony i kaony, które rozpadają się na miony – i całe mnóstwo neutrin. Przewagą tej metody jest to, że można wyprodukować skupioną wiązkę z zachowaniem kontroli nad jej kierunkiem i energią. Możliwe jest również wytworzenie neutrin taonowych przez bombardowanie celu wiązką o jeszcze wyższej energii, co powoduje powstanie cięższych cząstek, które mogą rozpaść się na taony (i towarzyszące im neutrina). Neutrina taonowe zostały ostatecznie zaobserwowane w Stanach Zjednoczonych w 2000 roku dzięki eksperymentowi zrealizowanemu przez

znajdujący się w laboratorium Fermilab akcelerator DoNuT. Był to ostatni fermion Modelu Standardowego, który czekał na odkrycie.

Ulubiona przez wszystkich opowieść o neutrinach również dotyczy tych akceleratorowych. W 2011 roku przez krótki czas wydawało się, że mogą one łamać jedną z najbardziej fundamentalnych zasad we Wszechświecie i wędrować z prędkością większą niż prędkość światła – coś, co od 1905 roku, kiedy Einstein sformułował swoją szczególną teorię względności, uchodziło za niemożliwe. Posługując się akceleratorem cząstek w CERN, wytworzono wiązkę neutrin, które skierowano 730 kilometrów na południe, bezpośrednio pod Alpami, do podziemnego laboratorium we Włoszech, gdzie mogły zostać zarejestrowane przez eksperyment OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus – Projekt Oscylacyjny z Emulsyjnym Rejestratorem Śladów). Podróżując z prędkością światła, neutrina powinny pokonać tę drogę w ciągu 2 milionowych części sekundy, tymczasem przybyły do celu o mniej więcej 60 miliardowych części sekundy wcześniej. Gdyby był to poprawny wynik, okazałby się prawdziwą rewolucją, podważając jeden z fundamentów współczesnej fizyki.

Nie jestem w żaden sposób związany z projektem OPERA, ale inny nietypowy rezultat pojawił się w eksperymentach, w które byłem osobiście zaangażowany. Kiedy zdarzy się coś tak niezwykłego, zostanie zauważone na długo przedtem, zanim eksperymentatorzy ogłoszą wyniki publicznie. Pierwsze założenie jest takie, że w analizie został przeoczony jakiś rodzaj błędu systematycznego – pomyłka w kalibracji, a może w modelowaniu. Błąd może kryć się wszędzie, toteż przeprowadza się liczne i skrupulatne kontrole. Lecz co zrobić, gdy wyczerpie się już wszystkie możliwe źródła niedokładności? Odrzucanie wyników, które się nie podobają, jest sprzeczne z metodą naukową, poza tym ich upublicznienie otwiera drogę do dalszej analizy i kolejnych pomysłów na to, gdzie leży problem. I to właśnie zrobił zespół projektu OPERA – kiedy zobaczyłem jego dane, nie przedstawiano ich jako nowej rewolucyjnej fizyki, ale jako dziwny wynik, który musi mieć bardziej przyziemne wytłumaczenie. Okazało się, że tak jest w istocie. Wobec tak ogromnych odległości synchronizacja i kalibracja sprzętu na wymaganym poziomie

dokładności to niebagatelne wyzwanie i w ciągu roku wykryto, gdzie leży problem – winny był drobny błąd synchronizacji w czasie. Neutrina mogą być dziwne, ale nie aż tak!

Problemy z neutrinami

Następną kwestią, jaką trzeba obmyślić po wybraniu źródła, jest sposób dokonywania pomiaru neutrin. Żeby to się udało, cząstki muszą z czymś oddziaływać.

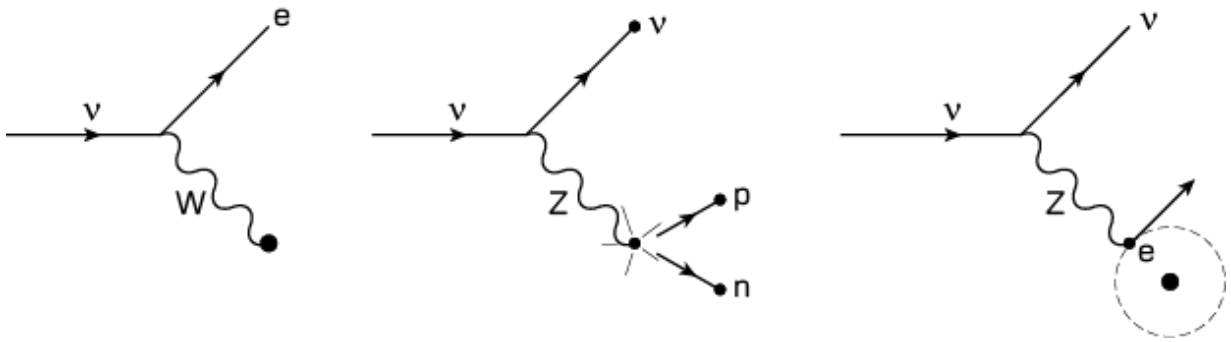
Kolejnym problemem jest niskie tempo zachodzenia dających się zarejestrować zdarzeń – w celu odnotowania zadowalającej liczby interakcji detektory muszą być ogromnych rozmiarów. Jeden z najsłynniejszych detektorów neutrin, „Eksperyment Raya Davisa", w którego nazwie figuruje nazwisko głównego naukowca, był ogromnym, cylindrycznym zbiornikiem, szerokim na 6 metrów i długim na 15 metrów, kryjącym w sobie około 800 ton płynu używanego w pralniach chemicznych – który zawiera mnóstwo chloru. Chodziło o wykrycie neutrin elektronowych pochodzenia słonecznego biorących udział w oddziaływaniu za pośrednictwem bozonu W. Emitowany przez neutrino bozon W był pochłaniany przez neutron w jądrze atomu chloru, który w efekcie zamieniał się w proton. Tym sposobem atom chloru, który zawiera 17 protonów, stawał się atomem argonu z 18 protonami. Argon jest gazem obojętnym chemicznie, po prostu więc unosił się ku powierzchni cieczy w zbiorniku.

Nawet w tak dużym zbiorniku, który w każdej sekundzie przenikały biliony neutrin, przeciętnie powstawałyby mniej niż dwa atomy argonu dziennie. Wobec tak niewielkiej produkcji trzeba było zapewnić zbiornikowi maksymalną osłonę przed jakimkolwiek promieniowaniem tła i promieniowaniem kosmicznym, które mogłyby zafałszować sygnał, dlatego umieszczono go 1,5 kilometra pod powierzchnią ziemi, w starej kopalni złota Homestake w Dakocie Południowej. Co kilka tygodni można było zebrać wystarczającą

próbkę argonu, żeby pokusić się o oszacowanie liczby zachodzących w tym czasie oddziaływań z neutrinami.

Eksperyment trwał od roku 1970 do 1994 i chociaż ukryty głęboko w kopalni ogromny zbiornik płynu do prania „na sucho” to zupełnie inny typ doświadczenia niż Wielki Zderzacz Hadronów, pozwolił dokonać czegoś, czego LHC nie potrafił. A mianowicie dostarczył dokładnych pomiarów tempa przebiegu oddziaływań neutrin elektronowych. Tak precyzyjnych, że jak się okazało, prowadziły do zaskakujących wniosków. Biorąc pod uwagę wszystko, co wiemy o Słońcu, powinniśmy wykryć znacznie więcej neutrin. Tymczasem brakowało blisko jednej trzeciej z nich. Rezultat stał się znany jako problem brakujących neutrin słonecznych i po wielokrotnym sprawdzeniu samego eksperymentu wydaje się, że mamy poważny problem z rozumieniem jednego z dwóch procesów – albo tego, jak działa Słońce, albo jak zachowują się owe cząstki.

Rozwiązanie problemu przyszło wraz z nowym eksperymentem, tym razem umiejscowionym w dawnej kopalni niklu w Sudbury w Kanadzie. Mowa o Sudbury Neutrino Observatory (SNO), które działało od 1999 do 2006 roku i składało się z 1000 ton oczyszczonej „ciężkiej wody” (wody, H_2O, o podwyższonej zawartości deuteru, izotopu wodoru, który w jądrze atomu poza protonem ma również neutron). SNO miało dwie dodatkowe zalety – umożliwiało wykrywanie oddziaływań poszczególnych neutrin w czasie realnym, zamiast akumulować wyniki na przestrzeni kilku tygodni, oraz było wrażliwe na oddziaływania neutrin za pośrednictwem bozonu W i bozonu Z. W oddziaływaniach przenoszonych przez bozon W neutrino elektronowe przekształca się w elektron, a bozon W jest absorbowany przez detektor. Oddziaływania przenoszone przez bozon Z pozwalają neutrinom o dowolnym zapachu wybijać elektrony z pobliskich atomów lub rozbijać jądra deuteru na proton i neutron. Takie oddziaływania dają dwa sygnały: promieniowanie gamma, produkowane, kiedy neutron jest wychwytywany przez inne jądro atomu, oraz indywidualne elektrony.



Trzy różne interakcje neutrin z detektorem SNO

Promieniowanie gamma łatwo jest wykryć, ponieważ opuszcza ono detektor. Natomiast elektrony nie docierają tak daleko, a wyłapanie ich w ogromnym zbiorniku z wodą jest niemożliwe, do pomiaru więc wykorzystuje się promieniowanie Czerenkowa. Nazwane na cześć swojego odkrywcy, Pawła Czerenkowa, promieniowanie to stanowi elektromagnetyczny ekwiwalent fali dziobowej na wodzie czy też fali uderzeniowej w powietrzu. Światło podróżujące przez dowolny materiał porusza się nieco wolniej niż w pustej przestrzeni. Jeżeli przyjrzymy się słomce w szklance wody, zauważymy, że tam, gdzie słomka wchodzi do cieczy, wydaje się złamana – to iluzja optyczna spowodowana zmianą kierunku rozchodzenia się promieni, które w wodzie poruszają się wolniej niż w powietrzu. Wysokoenergetyczne cząstki, które pędzą z prędkością bliską prędkości światła w próżni (prawdziwa prędkość graniczna we Wszechświecie), w takich ośrodkach jak ciekły detektor w SNO mogą poruszać się szybciej niż światło. Powstaje wówczas promieniowanie Czerenkowa, zazwyczaj w postaci błękitnej poświaty, przypominające falę uderzeniową, jaką wytwarza samolot, kiedy przekracza prędkość dźwięku w powietrzu. Detektory światła (fotopowielacze) wychwytują obydwa rodzaje promieniowania, gamma i Czerenkowa, wykrywając w ten sposób neutrina.

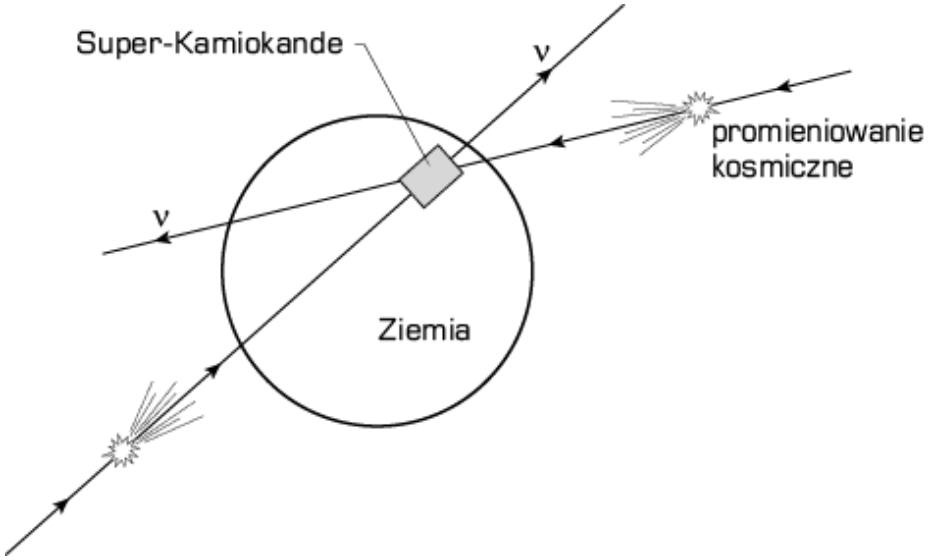
Oddzielając oddziaływania, w których pośredniczą bozony W (wrażliwe tylko na neutrina elektronowe), od tych z bozonami Z (wrażliwymi na neutrina o dowolnym zapachu, elektronowe, mionowe czy taonowe), dzięki SNO znaleziono rozwiązanie

problemu: Słońce powinno emitować wyłącznie neutrina elektronowe, ale wśród docierających na Ziemię cząstek około dwóch trzecich to neutrina elektronowe, a jedną trzecią stanowią inne zapachy (neutrina mionowe i taonowe). Neutrina mionowe i taonowe nie były wykrywane dzięki oddziaływaniom przenoszonym przez bozon W, ponieważ brakowało im energii, żeby zamienić się w swoich znacznie silniej naładowanych partnerów. Taki wynik oznaczał, że neutrina w trakcie podróży najwyraźniej zmieniły zapach, i to bez wchodzenia w jakiekolwiek interakcje. Żadna inna cząstka w Modelu Standardowym nie może tego zrobić i nie ma takiego oddziaływania, takiego diagramu Feynmana dla oddziaływania elektromagnetycznego, słabego czy silnego, który dopuszczałby podobne zjawisko. Dzieje się tutaj coś nowego.

Tyczasem inny ogromny detektor wodny, ulokowany w japońskiej kopalni, znalazł kolejny problem, tym razem z neutrinami atmosferycznymi, czyli produkowanymi przez promieniowanie kosmiczne neutrinami mionowymi. Ponieważ neutrina atmosferyczne zwykle mają wyższą energię i są mniej liczne niż neutrina słoneczne, potrzebny był znacznie większy zbiornik. W 1987 roku ukończono 3000-tonowy detektor Kamiokande, który w 1996 roku zastąpiono olbrzymim urządzeniem Super-Kamiokande, mającym kształt walca o średnicy około 40 metrów i takiej samej wysokości, zdolnym pomieścić 50 000 ton oczyszczonej wody, której masa 50-krotnie przekraczała masę SNO. W sieci dostępne są zdumiewające zdjęcia z budowy i pierwszego rozruchu Super-Kamiokande, przedstawiające zespół naukowców, który w małym nadmuchiwanym pontonie czyści fotopowielacze, rozmieszczone na krawędziach z wolna napełniającego się zbiornika.

Lecz nawet w tak dużym zbiorniku oddziaływania są niewiarygodnie rzadkie. Większość neutrin po prostu przelatuje przez Ziemię i ulatuje z powrotem w kosmos, bez jakiejkolwiek interakcji. Ponadto, skoro promieniowanie kosmiczne bombarduje Ziemię ze wszystkich stron, neutrina atmosferyczne nadlatują zewsząd: prosto z góry, jeżeli promieniowanie kosmiczne wpada w atmosferę nad Japonią, prosto z dołu, jeżeli wpada po przeciwnej stronie kuli ziemskiej, oraz ze wszystkich kierunków pośrednich. Porównując

cząstki przybywające z różnych stron, natrafiono na kolejny problem. Tempo detekcji neutrin przylatujących z góry z grubsza odpowiadało przewidywaniom, ale tempo detekcji tych nadlatujących z dołu było zbyt niskie. To problem neutrin atmosferycznych. I znowu dalsze eksperymenty wykazały, że te neutrina tam były, tylko zmieniły zapach z mionowych na inne.



Super-Kamiokande może wykryć neutrina powstałe z promieniowania kosmicznego, nadciągające ze wszystkich kierunków (skala nie została zachowana!)

Problemy z neutrinami słonecznymi i atmosferycznymi mówią nam, że te cząstki naprawdę zmieniają po drodze zapach, co jest zakazane w Modelu Standardowym. To odkrycie okazało się tak ważne dla naszego rozumienia widmowych neutrin, że przyznana w 2015 roku Nagroda Nobla powędrowała do Arthura B. McDonalda z SNO i Takaakiego Kajity z eksperymentu Super-Kamiokande. Czasami mówi się, że to pierwsza oznaka fizyki wykraczającej poza Model Standardowy, ponieważ wynika z tego, że neutrina muszą mieć masę.

Oscylujące neutrina

Rozwiązaniem problemu zmieniających zapach neutrin jest dość subtelny efekt kwantowy wymagający trzech składników, które napotkaliśmy już wcześniej w tej książce. Pierwszym z nich jest mieszanie, które omówiliśmy w rozdziale 5 w odniesieniu do kwarków. Kwarki są powiązane w pary, ale pary, które nie w pełni odpowiadają parom ładunku słabego. To znaczy, że bozon W może mieszać kwarki z różnych par, na przykład zamieniając kwark powabny w dolny. Wtedy powiedziałem, że nie zdarza się to wśród leptonów. I gdyby neutrina były bezmasowe, byłaby to prawda. Jeśli zaś mają one masę, mieszanie jest możliwe.

Drugi składnik dotyczy tego, jak cząstki się poruszają i, jak wyjaśniłem w rozdziale 6, wiąże się z pewnym wyimaginowanym krokomierzem o jednej wskazówce, która obraca się, gdy cząstka podróżuje. Jest coś, czego wcześniej nie wyjaśniłem, a co teraz nabiera znaczenia: prędkość, z jaką nakręca się krokomierz, w rzeczywistości zależy od masy cząstki. W wypadku cięższych cząstek wskazówka obraca się szybciej niż w wypadku pokonujących ten sam dystans cząstek o mniejszej masie.

W poszukiwaniu ostatniego składnika musimy cofnąć się aż do rozdziału 2. Kiedy cząstka nie jest poddawana pomiarom, robi wszystko naraz. W odniesieniu do neutrina możemy uznać, że rolę „pomiaru” odgrywa oddziaływanie słabe, które da się zarejestrować. Zatem w czasie między emisją bozonu W i bozonu Z neutrino robi wszystko naraz.

Teraz możemy połączyć z sobą wszystkie składniki i rozwiązać problem brakujących neutrin. Rozważmy neutrino słoneczne, produkowane, kiedy proton zamienia się w neutron, emitując bozon W. Bozon W rozpada się na antyelektron i neutrino, co daje nam pierwszy pomiar. Teraz, ponieważ leptony mogą się mieszać, powstałe neutrino wcale nie musi być neutrinem elektronowym, ale mionowym lub taonowym. A skoro nie dokonujemy bezpośredniego pomiaru neutrina, musimy rozważać wszystkie możliwości naraz.

Nasza cząstka leci w kierunku Ziemi. Wraz z pokonywaną odległością kręci się mały wyimaginowany krokomierz. Ponieważ musimy zanalizować wszystkie trzy możliwe rodzaje neutrin naraz, możemy to sobie wyobrazić jako jeden krokomierz z trzema wskazówkami. Trzy możliwe neutrina mają różne masy, zatem wskazówki poruszają się z różną prędkością.

Możecie myśleć o nich jako o trzech samochodach ścigających się po torze w kształcie okręgu. Nadajmy im nazwy „e", „mi" oraz „tau" i ustalmy, że w momencie startu samochody ustawione są jeden za drugim. Jednak poruszają się z nieznacznie różnymi prędkościami, z pojazdem „tau" powoli wysuwającym się przed pozostałe. W dalszej części wyścigu samochody mogą się wymieszać, gdyż okrągły tor sprawi, że najszybszy „tau" znajdzie się za konkurentami, zanim ponownie ich wyprzedzi i wyjdzie na prowadzenie.

Teraz, na różnych etapach wyścigu, możemy zadać pytanie: który samochód jako następny przekroczy linię startu? Na początku wyścigu będzie to pojazd „e". Po pewnym czasie na czele stawki znajdzie się zaś „tau". Jeszcze później samochód „tau" wykona pełne okrążenie i dogoni pozostałe, pojawiając się za nimi, a wtedy stanie się bardziej prawdopodobne, że to „mi" lub „e" jako następne przetną linię startu. Inaczej mówiąc, w miarę jak samochody pokonują kolejne okrążenia i zmieniają pozycję względem siebie, odpowiedź ulega zmianie.

W tej analogii pytanie, który samochód jako następny przetnie linię startu, jest odpowiednikiem rozważania, jak będzie się zachowywało neutrino podczas następnego pomiaru, czyli emisji bozonu W i zamiany w neutrino elektronowe, mionowe lub taonowe. Na początku wyścigu mamy neutrino elektronowe: samochód „e" jest na czele, pierwszy więc przekracza linię. Ponieważ jednak pojazdy poruszają się z różnymi prędkościami, to podczas okrążenia zmieniają kolejność: po przebyciu pewnego dystansu neutrina zmieniają zapach. Co na starcie było neutrinem elektronowym, może stać się neutrinem mionowym. I to właśnie dzieje się z neutrinami słonecznymi i atmosferycznymi... ze wszystkimi neutrinami. W trakcie podróży „oscylują" z jednego zapachu w inny.

Chcąc, żeby to wszystko działało, musimy dodać do Modelu Standardowego kilka nowych okruchów informacji. Po pierwsze, istnieją trzy różne masy neutrin, które odpowiadają trzem różnym prędkościom samochodów. Gdyby te trzy masy były takie same (albo nawet równe zeru, jak początkowo sądzono), samochody poruszałyby się po torze z identyczną prędkością i zachowałyby idealną synchronizację – neutrino elektronowe pozostałoby neutrinem elektronowym, ponieważ samochód „e" startowałby jako lider i zawsze pierwszy przekraczałby linię startu.

Po drugie, w grę wchodzi stopień zmieszania, czyli jak dalece prawdopodobne jest to, że bozon W zmiesza elektron z neutrinem mionowym, i tak dalej. Istnieją cztery liczby, które określają, jak mocno zmieszane są z sobą różne rodzaj neutrin, a informacja o nich zawarta jest w tak zwanej macierzy PMNS (od nazwisk: Bruno Pontecorvo, Ziro Maki, Masami Nakagawa i Shoichi Sakata). Gdyby wszystkie cztery liczby były równe zeru, nie byłoby żadnego mieszania – co odpowiada sytuacji, gdy na torze jest tylko jeden samochód. Jeśli zaczniemy od neutrina elektronowego, zawsze będzie tylko neutrino elektronowe. Gdyby liczby były małe, pozostałe samochody przez większość wyścigu pozostawałyby w boksach, wracając na tor tylko okazjonalnie, wobec czego neutrina rzadko zmieniałyby zapach. Gdyby zaś były duże, wszystkie samochody brałyby udział w wyścigu, cały czas.

O ile teoria mówi nam, że mieszanie może zachodzić, o tyle nie mówi nic o kontrolujących je liczbach. Prawdę mówiąc, to cztery z 26 parametrów swobodnych w Modelu Standardowym, do których powrócę w następnym rozdziale. Obecnie istnieje szeroki wachlarz eksperymentów neutrinowych, mierzących te liczby na podstawie analiz neutrin pochodzenia słonecznego, atmosferycznego oraz wytwarzanych w reaktorach i akceleratorach. Eksperymentów, które w końcu odpowiedzą nam na pytanie, jaką rolę oscylacje neutrin mogły odegrać w kształtowaniu Wszechświata. Istnieją jednak jeszcze bardziej fundamentalne pytania dotyczące owej tajemniczej cząstki.

Anty-antyneutrina

Rozprawiwszy się z faktami, jakimi dysponujemy obecnie na temat neutrin, czas wkroczyć do królestwa spekulacji. Przede wszystkim fakt, że neutrino nie przenosi ładunku elektrycznego, stwarza dziwaczną możliwość: być może jest ono własną antycząstką.

W wypadku każdego fermionu w Modelu Standardowym cząstka i jej antycząstka mają ładunki o przeciwnym znaku. Dodatnio naładowany pozyton jest antycząstką ujemnie naładowanego elektronu, ujemnie naładowany kwark antygórny jest antycząstką dodatnio naładowanego kwarka górnego, i tak dalej. Jednak, być może, neutralne neutrino i neutralne antyneutrino to w gruncie rzeczy to samo? Cząstka, która jest własną antycząstką, nosi nazwę fermionu Majorany, co stanowi połączenie nazwy nadanej jej na cześć Enrica Fermiego z nazwą nadaną na cześć Ettore Majorany, który sugerował możliwość istnienia takiej cząstki w 1937 roku. Dla odróżnienia wszystkie pozostałe fermiony oficjalnie uważane są za fermiony Diraca. To interesująca idea, aczkolwiek biorąc pod uwagę, jak rzadkie są oddziaływania neutrin, niemal niemożliwością jest stwierdzić, czy są one fermionami Majorany, czy nie. Najlepszą okazją do weryfikacji tego pomysłu jest tak zwany podwójny bezneutrinowy rozpad beta.

Podwójny rozpad beta występuje naturalnie w pewnych izotopach promieniotwórczych, których jądra stają się bardziej stabilne, jeżeli dwa neutrony jednocześnie zamienią się w protony. To ten sam rozpad beta, któremu przyglądaliśmy się wcześniej. Kwarki emitują bozony W, które rozpadają się na elektrony i antyneutrina. Jednak jeśli neutrino jest swoim własnym antyneutrinem, może zdarzyć się coś innego. Ta cząstka z pierwszego rozpadu beta w drugim mogłaby odgrywać rolę antyneutrina przychodzącego. W takiej sytuacji powstałyby jedynie dwa elektrony, bez neutrin. To właśnie jest podwójny bezneutrinowy rozpad beta, możliwy tylko wtedy, gdy neutrino jest własną antycząstką.

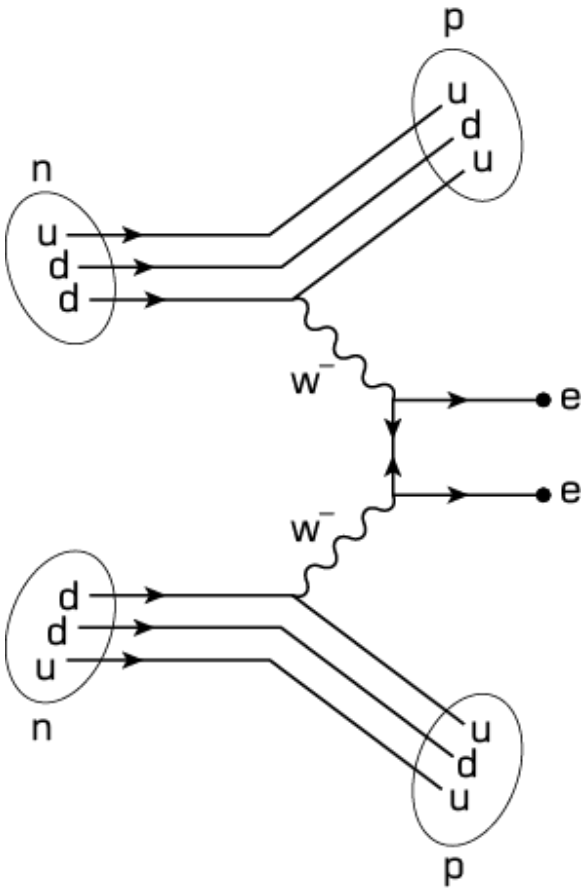


Diagram Feynmana dla podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta

Ponieważ istnieje tak niewiarygodnie małe prawdopodobieństwo wykrycia jakichkolwiek neutrin, niełatwo jest wskazać różnicę między normalną a bezneutrinową odmianą podwójnego rozpadu beta. W tej sytuacji kluczowe okazują się dwa elektrony. W wypadku rozpadu bezneutrinowego niosą one całą energię oddziaływania, w rozpadzie z neutrinami ta sama energia zostaje rozdzielona między cztery cząstki, dwa elektrony i dwa neutrina. Jeżeli poddamy dwa elektrony dokładnym pomiarom, to powinno być możliwe wykrycie rozpadu bez neutrin.

Wymaga to niezmiernie dużej dokładności pomiaru i niewiarygodnie czystego środowiska. Podwójny bezneutrinowy rozpad beta, jeśli w ogóle zachodzi, jest ekstremalnie rzadkim zjawiskiem i jakikolwiek przypadkowy rozpad beta z naturalnego źródła promieniowania może dostarczyć fałszywego pozytywnego

wyniku, który zniweczy dokładność eksperymentu. Już porcja promieniowania wiązki bananów byłaby za duża, naukowcy więc muszą być dobrze oczyszczeni – przeciętna osoba jest 350 razy bardziej radioaktywna od banana!

Najnowocześniejszym detektorem podwójnego rozpadu beta jest eksperyment SuperNEMO – wysokobudżetowy następca NEMO (Neutrino Ettore Majorana Observatory – Obserwatorium Neutrin Ettore Majorany), który działał od roku 2003 do 2011. To inny rodzaj doświadczenia, w którym dużą próbkę materiału radioaktywnego otaczają wysoce precyzyjne detektory elektronów. SuperNEMO jest obecnie budowany w kopalni pod francuskimi Alpami i być może za kilka lat pozwoli określić, czy neutrina rzeczywiście są swoimi antycząstkami – co uczyni je jeszcze dziwniejszymi.

Cząstki prawoskrętne

W oryginalnym sformułowaniu Modelu Standardowego neutrina pojawiały się wyłącznie w postaci lewoskrętnej. Ponieważ dowolna cząstka, która zyskuje masę dzięki polu Higgsa, musi występować w obydwu wersjach, lewo- i prawoskrętnej, neutrina nie mogły mieć masy. Skoro jednak oscylacje wykazały, że mają one masę, czy z tego wynika, że powinny istnieć również neutrina prawoskrętne? Jeżeli tak, to gdzie się podziewają? A może czerpią swoją masę z czegoś innego niż pole Higgsa?

Prawoskrętne neutrino byłoby bardzo dziwną cząstką. Nie podlegałoby żadnym oddziaływaniom Modelu Standardowego: nie przenosiłoby ładunku elektrycznego ani kolorowego, a będąc cząstką prawoskrętną, nie czułoby sił oddziaływania słabego. Z tego powodu neutrino prawoskrętne (a muszą być trzy, po jednym na każde neutrino lewoskrętne) nazywane jest neutrinem sterylnym.

Jakkolwiek trudne jest wykrycie zwykłych neutrin lewoskrętnych, wykrycie takiej cząstki prawoskrętnej byłoby znacznie trudniejsze. Właściwie wręcz niemożliwe. Jednak neutrino prawoskrętne może mieć wpływ na mieszanie neutrin. Jeżeli neutrino przeoscyluje

w stan prawoskrętnego neutrina sterylnego, może to zmienić prawdopodobieństwa wykrycia trzech zapachów neutrina lewoskrętnego. Trwają eksperymenty nad zidentyfikowaniem tych oscylacji w poszukiwaniu jakichkolwiek oznak wpływu neutrina sterylnego.

Jeżeli neutrina czerpią masę z pola Higgsa, to ostatnim elementem układanki jest powód, dla którego są dużo lżejsze od jakiejkolwiek innej cząstki – ponad milion razy lżejsze od następnej najlżejszej cząstki, elektronu. Istnieje prawdopodobne wyjaśnienie tego faktu, jednak najpierw dwa słowa o antyneutrinach. W rozdziale 2 wprowadziłem antymaterię, obracając diagram Feynmana. Cząstka wędrująca do wierzchołka staje się antycząstką oddalającą się od wierzchołka, przy czym antycząstki są równoważne cząstkom cofającym się w czasie. Teraz, jeżeli weźmiecie film z nagranym zegarem i puścicie go wstecz, wskazówki zegara będą się cofały. Lewoskrętny zegar poruszający się do przodu w czasie staje się prawoskrętnym zegarem poruszającym się do tyłu w czasie. To samo jest prawdą w odniesieniu do cząstek. Antymaterialny partner lewoskrętnego neutrina jest prawoskrętnym antyneutrinem. Jeżeli istnieje również prawoskrętne neutrino, będzie miało partnera w postaci lewoskrętnego antyneutrina.

Zaczynamy odczuwać dezorientację, tym bardziej że normalnie nie rozróżniamy między lewo- i prawoskrętnymi wersjami cząstek. Natomiast neutrina są inne i jeśli są one cząstkami Majorany, to sprawy stają się zarówno ciut prostsze, jak i ciut bardziej skomplikowane. Cząstki Majorany są swoimi antycząstkami, lecz jeśli istnieje neutrino prawoskrętne, wciąż mamy tutaj dwa stany: lewoskrętne neutrino, które jest tą samą cząstką co prawoskrętne antyneutrino, oraz prawoskrętne neutrino, które jest tą samą cząstką co lewoskrętne antyneutrino.

Jeśli obydwa stany istnieją, może zajść tak zwany mechanizm huśtawki. Zamiast połączenia lewo- i prawoskrętnych neutrin, prowadzącego ostatecznie do cząstki, której masa nie odbiega od masy innych cząstek Modelu Standardowego, równowaga może ulec zachwianiu. Lewoskrętne neutrino może stać się bardzo lekkie (co obserwujemy i chcielibyśmy wyjaśnić), a prawoskrętne

ekstremalnie ciężkie – około miliarda razy cięższe niż jakakolwiek znana nam cząstka, co oczywiście oznacza, że znajduje się poza zasięgiem któregokolwiek z przeprowadzanych obecnie eksperymentów (co znowu pasuje do naszych obserwacji, czy też, w tym wypadku, braku obserwacji – nigdy nie wykryliśmy prawoskrętnego neutrina). To świetne wytłumaczenie, lecz żeby było prawdziwe, najpierw musimy ustalić, czy neutrina są cząstkami Majorany.

Czas na neutrina

Wyjątkowe trudności w wykrywaniu neutrin przyczyniły się do powstania oryginalnych pomysłów na detektory tych cząstek. Skoro kluczowe dla ich wykrycia jest posiadanie dużego detektora wodnego, wykorzystajmy po prostu morze. Tak właśnie działa teleskop ANTARES, usadowiony u wybrzeży południowej Francji, 2,5 kilometra pod powierzchnią wody. Zawiera on wiele detektorów światła, fotopowielaczy, zawieszonych na pionowych łańcuchach, których zadaniem jest poszukiwanie rozbłysków promieniowania Czerenkowa, powstającego w wyniku zachodzących w ogromnej objętości wody oddziaływań z udziałem neutrin. Istnieją plany zbudowania w przyszłości znacznie większego teleskopu neutrinowego KM3NeT (km^3 Neutrino Telescope) i choć obsługa detektora ulokowanego na dnie morza sprawia sporo trudności, wśród których nie najmniejsze to zamieszkujące wodę wszelkie stworzenia, spoglądanie w tak ogromną objętość wody zapewnia czułość wystarczającą do łowienia cząstek o bardzo wysokich energiach.

Oczywiście, pod lodami Antarktydy nie toczy się zbyt bujne życie, tam również więc prowadzi się eksperymenty neutrinowe. Zbudowany na biegunie południowym detektor IceCube składa się z umieszczonych głęboko wewnątrz lodu łańcuchów fotopowielaczy, pokrywających obszar jednego kilometra sześciennego i zdolnych

wychwycić wszelkie promieniowanie Czerenkowa, sygnalizujące zachodzące w lodzie oddziaływania z udziałem neutrin. Idąc krok dalej, eksperyment ANITA zawiesza detektory pod balonem z helem, blisko 35 kilometrów nad biegunem południowym, skąd może wykrywać dowolne oddziaływanie neutrin w lodzie (tym razem dzięki wytwarzanym przez nie sygnałom radiowym) na olbrzymim obszarze – skutecznie zamieniając większość czapy lodowej w gigantyczną pułapkę na te cząstki.

Zaletą, która daje przewagę tym ogromnym detektorom, jest fakt, że są czułe na neutrina o niewiarygodnie dużej energii, produkowane w najbardziej burzliwych rejonach Wszechświata: supernowych, jądrach aktywnych galaktyk, czarnych dziurach i wielu innych ciekawych zjawiskach. Choć astronomia neutrinowa nie zastąpi w najbliższym czasie bardziej tradycyjnej astronomii fotonowej, zapewnia inną perspektywę. Niektóre fotony, zatrzymywane przez obłoki gazowe czy inne przeszkody, nie docierają do Ziemi, podczas gdy neutrina zazwyczaj po prostu przenikają wszystko na swojej drodze, dając nam bezpośredni wgląd w niektóre z najbardziej spektakularnych zdarzeń w kosmosie. Odkąd uruchomiono detektory neutrin, w obrębie Drogi Mlecznej lub jej okolicach obserwowano tylko jedną supernową, SN 1987A. Widziana z Ziemi w 1987 roku, pojawiła się w odległości 160 000 lat świetlnych (czyli 160 000 lat temu). Kamiokande w ciągu mniej więcej 13 sekund zarejestrował wówczas 11 zrodzonych w tej supernowej neutrin. W normalnych warunkach zarejestrowanie tylu neutrin ze Słońca, które znajduje się w odległości zaledwie 8 minut świetlnych, trwałoby około tygodnia. To jeszcze raz podkreśla oszałamiającą liczbę cząstek produkowanych w wybuchu supernowej: szacunki dla SN 1987A lokują tę liczbę w okolicach 10^{58}. Dodatkowo neutrina z supernowej przybyły kilka godzin wcześniej niż światło – nie dlatego, że podróżują z prędkością większą niż prędkość światła, ale dlatego, że fotony ulegają po drodze rozproszeniu, co sprawia, że ucieczka z obszaru eksplozji zajmuje im więcej czasu. Dzisiejsze zakrojone na szeroką skalę eksperymenty neutrinowe na świecie nie tylko na nowo sondują Model Standardowy, ale są również gotowe przekazać

wczesne ostrzeżenie astronomom poszukującym następnej supernowej!

Inny rodzaj fizyki cząstek

Neutrina są fascynujące. Rzeczywiście są to duchy Modelu Standardowego i przez długi czas były poza zasięgiem badaczy. Poznanie ich wymagało całkowicie innego podejścia niż to zastosowane w LHC: ukrytych głęboko w kopalniach ogromnych zbiorników wody, wysyłania wiązek cząstek przez kilometry twardych skał, obserwowania zachodzących w jądrze Słońca reakcji jądrowych, wykrywania promieniowania gamma i Czerenkowa. Zamiast przeczesywać miliony kolizji na sekundę, jak w LHC, detektory muszą być tak czułe, by dało się wychwycić garstkę zdarzeń.

Teraz jednak neutrina ujawniają nową wiedzę o Wszechświecie, po raz kolejny dowodząc, że natura jest dziwniejsza, niż nam się zdawało. Detektory neutrin dostarczają również wzorca dla eksperymentów poszukujących innych cząstek, które bardzo rzadko wchodzą w oddziaływania: ciemnej materii. Natura ciemnej materii to jedna z wielkich zagadek współczesnej fizyki i właśnie temu zagadnieniu poświęcimy teraz uwagę.

ROZDZIAŁ 9

W CIEMNOŚĆ

Fizyka cząstek wkracza obecnie na nieznane terytoria. Model Standardowy od czasu jego sformułowania w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku wskazywał kierunek badań: do odkrycia było więcej kwarków i leptonów, bozony W i Z, na koniec bozon Higgsa. Masy neutrin były niespodzianką, ale zostały dodane do całości obrazu. Obraz ten jest obecnie stosunkowo kompletny: dwanaście cząstek, trzy oddziaływania, mechanizm Higgsa i zdumiewająco udany opis subatomowego świata.

W tym rozdziale umiejscowię Model Standardowy w kontekście. Wcześniej w tej książce skupiałem się na jego niebywałych sukcesach, a teraz nadszedł czas, aby pomówić o otwartych problemach, za sprawą których wiemy, że Model Standardowy jest niepełny. Aby zobaczyć, co się dzieje, gdy przyjmiemy jego przewidywania, trzeba umiejscowić je w większej skali i porównać z tym, co znajdujemy w otaczającym nas świecie. Okaże się, że problemy są ogromne.

Gdzie jest cała antymateria?

Uważamy, że to oczywiste: świat zbudowany jest z materii. Dirac pierwszy przewidział istnienie antymaterii, co było jednym z wniosków wynikających ze sformułowanego w 1928 roku równania, ale to z kolei prowadziło do narzucającego się pytania – jakim cudem takie dziwactwo może istnieć, skoro nigdy tego nie widzieliśmy? Obecnie

antymateria stanowi zasadniczy składnik Modelu Standardowego, jednak materia i antymateria zawsze powstają w jednakowych ilościach. Wysokoenergetyczny foton może przekształcić się w elektron i pozyton. Wysokoenergetyczny gluon może przekształcić się w kwark i antykwark. Jedna cząstka materii i jedna cząstka antymaterii. Dzisiaj wszystkie ciała zbudowane są z materii, a nie antymaterii. Problem antymaterii uległ odwróceniu, obecnie pytanie brzmi: gdzie ona się podziała? Jakim sposobem udało nam się zgubić połowę tego, co składa się na Wszechświat?

Możliwe jest wytłumaczenie tego faktu, ale wymaga ono, aby materia i antymateria zachowywały w nieco odmienny sposób. Zaraz po Wielkim Wybuchu Wszechświat był wypełniony w połowie materią, a drugą połowę stanowiła antymateria. Wysokoenergetyczne fotony, gluony, bozony W i Z, a także bozony Higgsa, tworzyły się i rozpadały na pary cząstek, z których jedna należała do materii, a druga do antymaterii. Jeśli jednak zachowanie materii i antymaterii nieznacznie różniło się od siebie, wówczas ta równowaga 50 procent materii i 50 procent antymaterii mogła zostać lekko zaburzona na korzyść materii, powiedzmy 50,001 procent do 49,999 procent. W gorącym i gęstym młodym Wszechświecie większość cząstek materii i antymaterii trafiała na siebie i anihilowała, z powrotem przekształcając się w bozony. Jednak z powodu zakłócenia równowagi nieduża ilość materii przetrwała. Z tej „drobniutkiej” resztki powstał cały obserwowalny Wszechświat.

Aby takie wytłumaczenie miało szansę, materia i antymateria muszą w niewielkim zakresie różnić się od siebie. W języku Modelu Standardowego: muszą istnieć pewne oddziaływania pozwalające nam nakreślić diagram Feynmana, który je rozdzieli. Tu napotykamy problem – niczego takiego nie ma.

Wprowadziłem pojęcie antymaterii w rozdziale 2, zwyczajnie dokonując obrotu wierzchołka na diagramie Feynmana. Kiedy to robimy, elektron poruszający się do przodu na osi czasu zamienia się w elektron poruszający się wstecz na osi czasu. Ten antyelektron ma ładunek elektryczny przeciwny do ładunku elektronu, ale zasadniczo nadal jest to elektron – samochód zasadniczo pozostaje samochodem niezależnie od tego, w którą stronę ulicy się porusza.

Cząstki mają też spin i występują w dwóch wersjach, lewo- i prawoskrętnej, aczkolwiek tylko oddziaływania słabe są wrażliwe na te różnice (oddziaływanie słabe jest źródłem tak wielu kłopotów w Modelu Standardowym!). Jak wspominałem w poprzednim rozdziale, zmiana kierunku, w jakim cząstka porusza się względem osi czasu, łączy się z dokonaniem transformacji parzystości: bozony W oddziałują tylko z cząstkami lewoskrętnymi i prawoskrętnymi antycząstkami.

Tak więc gdy przyjrzymy się każdemu oddziaływaniu, każdemu możliwemu w Modelu Standardowym diagramowi Feynmana, a następnie zamienimy cząstki na antycząstki, jest to równoważne z zamianą ich ładunku (C) i parzystości (P) na przeciwne. Po takiej zamianie każde możliwe do przeliczenia równanie pozostanie niezmienione – znamy to jako symetrię CP. Zgodnie z symetrią CP, materia i antymateria naprawdę zachowują się w identyczny sposób, a jeśli symetria CP jest prawdziwa, Wszechświat powinien zawierać połowę materii i połowę antymaterii.

Jeżeli mamy wyjaśnić, dlaczego nasz Wszechświat zawiera tylko materię, odpowiedzieć na pytanie, dlaczego antymateria znikła, to symetria CP musi w jakiś sposób być naruszana – proces ten znamy pod nazwą łamania symetrii CP. Próby wyjaśnienia przyczyn nieobecności antymaterii we Wszechświecie koncentrowały się głównie na poszukiwaniu oznak łamania symetrii CP w oddziaływaniach cząstek.

Choć stwierdziłem, że Model Standardowy nie dopuszcza łamania symetrii CP, to w istocie jest jedno miejsce, w którym może to zachodzić: mieszanie, które w odniesieniu do kwarków poznaliśmy w rozdziale 5, a w odniesieniu do neutrin w rozdziale 8. Mieszanie jest drobnym odstępstwem od wyrównania pomiędzy parami fermionów w Modelu Standardowym (stanowią je na przykład elektron i neutrino elektronowe, kwark dolny i górny) i parami ładunku słabego. Oznacza to, że bozony W mogą mieszać pary kwarków, umożliwiając rozpad wszystkim ciężkim kwarkom, a także mieszać pary leptonów, umożliwiając neutrinom zmianę zapachu w trakcie ruchu. I okazuje się, że mieszanie to może zachodzić nieco inaczej dla materii i antymaterii.

Mieszanie kwarków objęto intensywnymi badaniami, które potwierdziły istnienie łamania symetrii CP. Materia i antymateria rzeczywiście zachowują się inaczej. Przykładem jest rozpad kaonu, który może rozpaść się albo na dodatni pion, ujemny elektron i antyneutrino elektronowe, albo na ujemny pion, dodatni pozyton i neutrino elektronowe. Oba rozpady powinny zachodzić z jednakową częstością, ale ten, w którym powstaje elektron, zachodzi około 0,3 procent częściej niż proces, w którym tworzy się pozyton. To rodzaj efektu, którego szukamy, lecz jak każda oznaka łamania symetrii CP z udziałem kwarków, w zasięgu jego wpływu znajduje się tylko kilka cząstek; stanowczo za mało, aby objaśnić zdominowany przez materię Wszechświat, w którym żyjemy.

Jeżeli kwarki nie są odpowiedzią na to pytanie, może będą nią neutrina. Mogą one łamać symetrię CP na znacznie większą skalę, jednak znacznie trudniej je badać, toteż obecnie nie wiemy, czy neutrina będą pomocne. Znalezienie odpowiedzi na to pytanie znajduje się na szczycie listy priorytetów fizyki cząstek i jest celem kilku planowanych eksperymentów na neutrinach. Jeżeli okaże się, że te cząstki również nie łamią symetrii CP w dużym stopniu, to potrzebne będzie nowe objaśnienie braku antymaterii.

Zagadnienie łamania symetrii CP ma jeszcze jeden ciekawy aspekt. W Modelu Standardowym tylko oddziaływania słabe traktują materię i antymaterię odmiennie, lecz nie musi tak być: oddziaływania silne również mogłyby to robić. Jeśli rzeczywiście dołożyły coś od siebie, mogłoby to stanowić dodatkowy efekt, który pchnął nasz Wszechświat w kierunku całkowitej dominacji materii. Jednak oddziaływania silne zdają się idealnie respektować symetrię CP i na razie nie mamy pojęcia, dlaczego tak jest. To kolejna otwarta kwestia w fizyce, znana jako *strong CP problem*.

Łamanie symetrii CP nie jest jedynym możliwym rozwiązaniem problemu brakującej antymaterii. Pewne teorie sugerują, że antymateria w inny sposób reaguje na oddziaływanie grawitacyjne: materia i antymateria mogą się odpychać. W naszej części Wszechświata może nie być antymaterii, ponieważ obecna tu materia ją odepchnęła! Szalenie trudno jednak wytworzyć dostatecznie dużo antymaterii, aby przeprowadzić pomiar jej reakcji

na grawitację, tak więc choć pomysł wydaje się osobliwy, w tej chwili nie możemy wykluczyć jego słuszności.

Model Standardowy: dlaczego?

Pod wieloma względami Model Standardowy jest modelem wydajności. Opisuje świat, wykorzystując zaledwie dwanaście fermionów – w rzeczywistości istotne są tylko trzy: elektron, kwark górny i kwark dolny, które tworzą atomy. Problem w tym, że Model Standardowy mówi nam „w jaki sposób", ale nie wspomina „dlaczego", czyli precyzyjnie opisuje zachowanie cząstek, ale nie wyjaśnia, dlaczego akurat konkretnie te dwanaście cząstek istnieje.

Równanie Diraca można połączyć z symetriami cechowania i mechanizmem Higgsa na wiele różnych sposobów i nie jest jasne, dlaczego natura wybrała akurat ten z Modelu Standardowego. Dlaczego sposób ten wymaga trzech oddziaływań – elektromagnetyzmu, oddziaływań słabych i silnych... Dlaczego oddziaływania słabe rozróżniają cząstki lewo- i prawoskrętne. Dlaczego kwarki przenoszą ułamkowy ładunek elektryczny, elektron ładunek jednostkowy, a neutrino nie przenosi ładunku... Dlaczego kwarki przenoszą ładunek kolorowy, a leptony nie... Dlaczego istnieją trzy generacje materii, choć wydaje się, że jedna w zupełności by wystarczyła... I nie wiemy jeszcze, czy prawoskrętne neutrina istnieją, albo czy neutrina są cząstkami Majorany (cząstkami, które są również antycząstkami).

Innymi słowy, Model Standardowy jest empiryczny – został zbudowany w taki sposób, aby pasował do tego, co widzimy w eksperymentach. Rozumiemy pojedyncze składniki, ale nie to, dlaczego zostały złożone z sobą w takiej formie. Musi istnieć jakaś podstawa dla tego wszystkiego, bardziej fundamentalny opis natury. Zwyczajnie nie wiemy jeszcze, czym on jest.

Nawet jeśli na razie zaakceptujemy strukturę Modelu Standardowego, wciąż będzie on zawierał 26 „parametrów swobodnych", 26 liczb, których nie potrafimy wytłumaczyć, ale takie

ich wartości doświadczalnie wyznaczyliśmy. Wspominałem o nich w różnych fragmentach książki, tutaj wszystkie zebrałem w jednym miejscu:

- natężenie („stałe sprzężenia”) oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetyzmu,
- natężenie pola Higgsa (energia próżni lub „wartość oczekiwana próżni”),
- masa bozonu Higgsa,
- masy sześciu kwarków i sześciu leptonów, które można również interpretować jako wartość oddziaływania tych cząstek z polem Higgsa,
- trzy liczby regulujące mieszanie kwarków i czwarta liczba regulująca łamanie przez kwarki symetrii CP,
- kolejne cztery liczby dla mieszania neutrin i łamania przez nie symetrii CP,
- liczba regulująca łamanie symetrii CP przez oddziaływania silne, choć wydaje się, że jest ona dokładnie równa zeru.

Kiedy już dokonaliśmy pomiaru tych liczb, możemy wstawiać je do równań Modelu Standardowego i będziemy otrzymywali zdumiewająco dokładne przewidywania (łącznie z masami bozonów W i Z). Jednak to wciąż nieco za mało, aby być w pełni usatysfakcjonowanym, jest bowiem aż 26 powodów, by sądzić, że musi istnieć jakieś głębsze wytłumaczenie dla tego wszystkiego.

Jakby mało było tych 26 liczb, są jeszcze inne podstawowe parametry liczbowe już spoza Modelu Standardowego, takie jak choćby prędkość światła. Jakakolwiek teoria z tyloma niewyjaśnionymi wątkami, tyloma niewyjaśnionymi zagadnieniami, z całą pewnością nie może być kompletna. Jeżeli pogłębimy nasze rozumienie natury, sformułujemy teorię objaśniającą strukturę Modelu Standardowego, być może teoria ta wytłumaczy niektóre z powyższych liczb.

Model Standardowy: zaplątani w pętle

Coś gnije w samym sercu Modelu Standardowego. Po raz pierwszy zauważono to za sprawą elektrodynamiki kwantowej, najprecyzyjniejszej teorii w historii nauki, ale w latach trzydziestych XX wieku była to teoria, która nie pozwalała na formułowanie jakichkolwiek przewidywań. Obliczenia nie przynosiły poprawnych wyników. Zupełnie jakby początkowe obietnice miały zostać pogrzebane pod nawałem nonsensownych działań matematycznych. Problem tkwił w pętlach.

Pętle mogą się przydarzyć w nieco bardziej skomplikowanych diagramach Feynmana (o czym przekonaliśmy się w rozdziale 2), diagramach, które zawierają bozon tymczasowo zamieniający się w cząstkę i antycząstkę albo fermion emitujący bozon i niemal natychmiast absorbujący go z powrotem. Cząstki w pętlach są wirtualne – to obiekty zamknięte w pułapce diagramu Feynmana, których nigdy nie możemy poddać bezpośrednim pomiarom. Zasada nieoznaczoności pozwala tym cząstkom naginać reguły, pożyczać energię, z jednym tylko warunkiem: im więcej energii jest pożyczone, tym krótszy jest czas pożyczki. Pętle te mają tendencję do eskalacji żądań, pożyczania coraz więcej i więcej, przez co stają się coraz mniejsze, by ostatecznie pożyczyć nieskończoną ilość energii. Kiedy wynik obliczeń jest nieskończonością, zwykle znaczy to, że coś poszło katastrofalnie źle. Tak się miały sprawy w latach trzydziestych XX wieku: elektrodynamika kwantowa była wadliwa.

Aby rozwiązać problem tych nieskończonych wartości, konieczne było rozwinięcie całej gałęzi mechaniki kwantowej zwanej renormalizacją, dzięki której pojawiły się metody zamiatania nieskończoności pod dywan i powrotu do „normalnych” wyników. Zasadniczo renormalizacja mówi, że tak naprawdę pętle nie mogą uciekać do nieskończonych energii, ponieważ od pewnego miejsca musi włączać się inny rodzaj oddziaływania. Istnieje wiele pomysłów na to, czym mogłoby ono być (takich jak supersymetria lub teoria strun), ale nie jest to istotne, gdy obliczenia dotyczą takich zjawisk jak rozpad beta albo zderzenia zachodzące w LHC. To tak, jakbyśmy

wybrali się na przejażdżkę samochodem i martwili się o to, co zrobią wszystkie inne osoby kierujące samochodami na wszystkich drogach świata – owszem, wszyscy ci ludzie są gdzieś tam w swoich autach i kto wie, jakimi drogami będą podążać w przyszłości, ale jest to poziom szczegółowości, który w danej chwili nie ma znaczenia, za to czyni naszą jazdę tak skomplikowaną, że staje się ona niemożliwa. Żeby dokądkolwiek dojechać, musimy się od tego odciąć: będziemy myśleć tylko o samochodzie, którym jedziemy, oraz o tych, które są w zasięgu wzroku. O pozostałe się nie martwimy.

To samo dotyczy renormalizacji: wymuszamy odcięcie, ciągniemy za hamulec awaryjny, aby powstrzymać pętle przed ucieczką w nieskończoność. Tak naprawdę nie musimy teraz martwić się tym, co dzieje się w wysokich energiach, wystarczy, że powiemy, iż jest to coś innego, niż proponuje Model Standardowy. Matematyka zawodzi w elektrodynamice kwantowej dlatego, że próbujemy posłużyć się nią tam, gdzie to nie jest dopuszczalne, zatem należy zatrzymać się przed osiągnięciem tego punktu. Paul Dirac nigdy nie był zachwycony stosowaniem takiego podejścia, wyczuwał bowiem, że to sztuczne odcięcie psuje piękno jego równania. Nawet Richard Feynman, który pierwszy stosował wiele z tych metod, określił renormalizację jako „hokus-pokus”. Niemniej jednak trudno przecenić jej znaczenie – bez niej w Modelu Standardowym nie można nic wyliczyć.

Renormalizacja mówi nam tak naprawdę, że Model Standardowy jest tylko przybliżeniem. Przewidywania załamują się dla skrajnie wysokich wartości energii, ponieważ w takich warunkach model zwyczajnie nie działa. Musi stać za tym jakieś głębsze wytłumaczenie Kiedyś w przyszłości, może za pomocą akceleratora cząstek nowej generacji, możliwe, że już niedługo, dokonamy nowego odkrycia, które takie głębsze objaśnienie przyniesie. Model Standardowy przetrwa jako przybliżenie nowej teorii dla niskich energii, jak prawa Newtona przetrwały w roli przybliżenia teorii względności dla niskich energii.

Ciemna materia

Jeśli parametry swobodne i renormalizację uznać za dowody poszlakowe świadczące o tym, że należy szukać pogłębionej teorii, to jest jeszcze dowód obciążający w sposób jednoznaczny. Najmocniejszy dowód nie pochodzi ze świata subatomowego. Dostarczają go jedne z największych obiektów we Wszechświecie – galaktyki.

Galaktyki są piękne. Ogromne skupiska gwiazd, wirujące spirale, dyski i kule, spajane przez grawitację. Znajdujemy się w odległości dwóch trzecich jej promienia od środka Drogi Mlecznej, naszej własnej Galaktyki, poruszając się dokoła jej jądra z prędkością około 800 000 kilometrów na godzinę. Mimo tak dużej prędkości trzeba mniej więcej 200 milionów lat, aby wykonać jedno pełne okrążenie. Jeden obrót temu po Ziemi biegały dinozaury... Jednak ruch obrotowy Galaktyki wskazuje na pewien problem: Droga Mleczna, jak niemal wszystkie inne galaktyki, obraca się za szybko. Te piękne spirale wirują tak prędko, że powinny się rozpaść.

Problem ten po raz pierwszy dostrzeżono w latach trzydziestych XX wieku, ale dopiero opublikowana w latach sześćdziesiątych praca Very Rubin sprawiła, że zwrócono na niego uwagę. O co chodzi? Otóż na podstawie tego, jak jasna jest galaktyka, możliwe jest oszacowanie liczby tworzących ją gwiazd (typowo są ich setki miliardów), a więc także jej masy. Na podstawie masy i rozmiarów galaktyki można wyznaczyć wartość siły grawitacyjnej. Im większe przyciąganie grawitacyjne galaktyki, tym szybciej poruszają się jej gwiazdy. Ta sama zasada dotyczy wszystkich ciał znajdujących się na orbicie: Międzynarodowa Stacja Kosmiczna okrąża Ziemię w odległości około 400 kilometrów w przybliżeniu z prędkością 7,6 km/s (ponad 27 000 kilometrów na godzinę), natomiast Księżyc jest oddalony o niemal 400 000 kilometrów i okrąża naszą planetę z prędkością ledwie 1 km/s (prawie 4000 kilometrów na godzinę). Kiedy przedstawimy na wykresie spodziewane prędkości gwiazd w zależności od odległości od środka galaktyki, otrzymamy „krzywą rotacji”.

Oprócz wyliczenia, jak szybko galaktyki się obracają, możliwe jest dokonanie pomiaru rzeczywistej prędkości i tu ujawnia się problem: mierzona prędkość zawsze jest większa od wartości spodziewanej, zwłaszcza w dużej odległości od środka galaktyki.

Jedna możliwość jest taka, że obliczenia zwyczajnie są błędne, ponieważ model oddziaływania grawitacyjnego (wywodzący się z ogólnej teorii względności Einsteina) nie w pełni opisuje stan faktyczny. Podejmowano próby rozwiązania problemu od tej strony, tworząc nowy model po prostu w taki sposób, aby zmodyfikowane równania grawitacji odpowiadały danym z obserwacji. MoND (zmodyfikowana dynamika Newtona) jest teorią, która pojawiła się w latach osiemdziesiątych XX wieku i znakomicie opisuje krzywe rotacji galaktyk, sugerując, że dla obiektów w bardzo dużej skali grawitacja działa nieco inaczej.

Inne wytłumaczenie zakłada po prostu, że galaktyki zawierają znacznie więcej materii, ale nie możemy jej dostrzec – to ciemna materia, koncepcja znana mniej więcej od lat dwudziestych XX wieku. Ponieważ jej nie widzimy, nie bierzemy jej pod uwagę, gdy wyliczamy wartość sił grawitacyjnych, przez co siły te są niedoszacowane. Wystarczy dołożyć ciemną materię i można uzyskać inne wyjaśnienie krzywych rotacji, również doskonale dopasowane do danych pomiarowych.

Żeby zdecydować, czy ciemna materia, czy MoND stanowi rozwiązanie, potrzebne były dane z większej liczby pomiarów i uzyskano je dzięki soczewkowaniu grawitacyjnemu. Soczewkowanie grawitacyjne jest efektem wynikającym z jednego z wyjątkowych przewidywań ogólnej teorii względności, zgodnie z którym masa wywołuje zakrzywienie przestrzeni i czasu. Zakrzywienie to jawi się jako przyciąganie grawitacyjne, ale zmienia też tor fotonów w pobliżu bardzo ciężkich obiektów. Obszar przestrzeni wypełniony dużą ilością masy zachowuje się jak gruba warstwa szkła w drzwiach łazienkowych, zniekształcając obraz tego, co znajduje się po drugiej stronie. Kiedy próbujemy obserwować gwiazdy znajdujące się za obiektem tak ciężkim jak galaktyka, ich obraz będzie zniekształcony – to właśnie soczewkowanie grawitacyjne. Soczewkowanie pozwala nam tworzyć mapy rozkładu masy we Wszechświecie bez

konieczności bezpośredniego obserwowania obiektów i dostarcza jednego z najsilniejszych dowodów przemawiających za ciemną materią w postaci Gromady Pocisk, będącej gromadą galaktyk, znajdującą się w odległości mniej więcej 3,7 miliarda lat świetlnych od Ziemi.

Gromada Pocisk jest tak naprawdę dwiema gromadami galaktyk, które zderzyły się czołowo. Teleskopy zbierają promieniowanie powstałe w wyniku ścierania się dwóch obłoków wodoru, atomy są jonizowane i emitowane jest promieniowanie rentgenowskie. To promieniowanie wskazuje nam, gdzie znajduje się cała zwykła materia. Tymczasem pomiary efektu soczewkowania grawitacyjnego mówią coś innego: większość masy zderzających się galaktyk zwyczajnie kontynuuje ruch, niewidzialnie przemieszcza się tak, jakby w ogóle nie doszło do zderzenia. Tę nadprogramową masę widać tylko za pośrednictwem efektów soczewkowania grawitacyjnego, ale kiedy połączyć te dane z wynikami obserwacji w zakresie rentgenowskim promieniowania, wyraźnie widać, że w galaktykach znajdują się dwa rodzaje materii: zwykła i ciemna. Jeśli ciemna materia jest również odpowiedzią na problem krzywej rotacji galaktyki, musi być jej bardzo dużo – w galaktyce takiej jak Droga Mleczna ciemnej materii powinno być dziesięć razy więcej niż normalnej.

Czym więc jest ciemna materia? Pierwszy pomysł był taki, że jest to zwykła materia, której nie możemy zobaczyć, jakieś bardzo ciężkie, stosunkowo nieduże ciała niebieskie, nieemitujące światła, jak czynią to gwiazdy – planety, czarne dziury, asteroidy itp. Jeśli mielibyśmy objaśnić za ich pomocą krzywe rotacji i inne efekty, to obiekty te powinny egzystować w zewnętrznych rejonach galaktyk (halo galaktycznym), toteż nadano im nazwę MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects – masywne, zwarte obiekty halo). Problem w tym, że aby obiekty MACHO mogły być źródłem obserwowanych efektów, potrzebne były w ogromnej liczbie, znacznie większej, niż rzeczywiście mogłoby ich być na podstawie całej naszej wiedzy o powstawaniu galaktyk. MACHO nie są rozwiązaniem problemu. Na szczycie listy kandydatów do obsadzenia roli ciemnej materii jest teraz przeciwieństwo MACHO, czyli WIMP

(Weakly Interacting Massive Particles – słabo oddziałujące masywne cząstki). Ciemną materię mogą tworzyć cząstki zupełnie nowego rodzaju. Jest to pierwsza wskazówka, co znajduje się poza Modelem Standardowym.

Jeżeli cząstki WIMP są poprawną odpowiedzią, to kilka rzeczy już o nich wiemy: reagują na oddziaływanie grawitacyjne, ale nie elektromagnetyczne (dlatego bardziej odpowiednią nazwą dla ciemnej materii mogłaby być materia przezroczysta). Wiemy, że nie reagują też na oddziaływanie silne, w przeciwnym razie oddziaływałyby z jądrami atomów. Mogą brać udział w oddziaływaniach słabych, a to mocno upodobniałoby je do neutrin. W zasadzie, skoro niedawno odkryliśmy, że neutrina jednak mają masę, można je uznać za słabo oddziałujące masywne cząstki. I są ich niezliczone ilości w każdej galaktyce, może więc w odniesieniu do ciemnej materii nie potrzebujemy żadnego egzotycznego objaśnienia – to po prostu przypominające duchy neutrina!

Oczywiście, odpowiedź nie jest tak prosta. Ciemna materia to dodatkowa masa, a więc dodatkowa grawitacja, utrzymująca galaktyki w całości w ruchu wirowym. Żeby mogło się to udać, ciemna materia musi raczej poruszać się dość wolno. Jeśli poruszałaby się za szybko, uleciałaby z galaktyki niczym statek kosmiczny startujący w przestrzeń międzygalaktyczną. Jedno wiemy o neutrinach – są niewiarygodnie lekkie i poruszają się niemal z prędkością światła. Wszystko, co porusza się z taką prędkością, bez kłopotu ucieknie z galaktyki, a to oznacza, że neutrina nie mogą być ciemną materią: jak wrząca woda ucieka z czajnika, tak neutrina nie zostałyby w galaktykach dostatecznie długo, aby odegrać rolę czynnika spajającego te obiekty. Ciemna materia nie może być „gorąca”.

Cząstki WIMP ciemnej materii muszą być „zimne”: muszą poruszać się z niedużą prędkością, co oznacza, że powinny być ciężkie. Nie za ciężkie, wtedy bowiem mielibyśmy kolejny problem – poruszałyby się tak wolno i zbijały pod wpływem grawitacji tak sprawnie, iż galaktyki byłyby ciałami znacznie mniejszymi i gęstszymi, niż wynika to z naszych obserwacji. Precyzyjne modele Wszechświata sugerują, że ciemna materia to cząstki WIMP o masie w zakresie skali

elektrosłabej (około 100 GeV). W Modelu Standardowym nie ma nic podobnego. Ciemna materia jest wszędzie wokół nas, znajduje się we wszystkich galaktykach i wypełnia cały Wszechświat – w filiżance waszej ulubionej kawy w każdej dowolnej chwili zapewne jest jakieś pięć cząstek WIMP – tymczasem nie mamy pojęcia, czym one są.

Modele dają nam jednak cień nadziei na to, że dowiemy się więcej. Jeżeli cząstki WIMP zostały wytworzone po Wielkim Wybuchu we właściwej liczbie, to prawdopodobnie muszą brać udział w oddziaływaniach słabych – oznacza to, że mamy szansę je wykryć, jak udało się z neutrinami. Znamy to jako „cud WIMP", ponieważ wynika z tego, że na przestrzeni kilku następnych lat powinniśmy móc eksperymentalnie dokonać pomiarów laboratoryjnych i ostatecznie rozwikłać zagadkę ciemnej materii. Więcej o tych eksperymentach opowiem w kolejnym rozdziale.

Ciemna energia

Podczas gdy efekty grawitacyjne dają nam najsilniejsze wskazówki na temat istnienia ciemnej materii, są jeszcze znaki sugerujące, że sama grawitacja jest odpowiedzialna za coś nieoczekiwanego.

Jest dla mnie czymś zdumiewającym, że jeszcze w 1925 roku powszechnie uważano, iż nasza galaktyka, Droga Mleczna, jest jedyna w całym Wszechświecie. Dopiero wtedy amerykański astronom Edwin Hubble wykonał pomiary widocznych na nocnym niebie gromad gwiazd i mgławic, dowodząc, że muszą one być całkowicie odrębnymi galaktykami, położonymi znacznie dalej, niż początkowo sądzono. Hubble wykorzystał następnie pomiary przesunięcia ku czerwieni w widmach i zbadał, jak wygląda ruch tych odległych galaktyk względem nas. Jest to podobne do efektu Dopplera: dźwięk policyjnych syren wchodzi w wyższe tony, gdy radiowóz się zbliża, oraz niższe, kiedy radiowóz się oddala. Światło docierające do nas od gwiazd ma, jak się zdaje, wyższą częstotliwość (wykazuje przesunięcie ku błękitowi), gdy gwiazdy zbliżają się do nas, niższą zaś (wykazuje przesunięcie ku czerwieni), gdy się

oddalają. Mierząc przesunięcie w widmach odległych galaktyk, Hubble odkrył, że wszystkie się od nas oddalają. Skoro się oddalają, to w jakimś punkcie historii Wszechświata musiały być znacznie bliżej. Około 13,8 miliarda lat temu wszystko musiało być skupione w jednym miejscu: tam, gdzie doszło do Wielkiego Wybuchu, gdzie narodził się Wszechświat, jaki znamy. Nie tylko materia, ale również przestrzeń i czas rozszerzają się od tego punktu.

Jeżeli Wielki Wybuch był ogromną eksplozją, to grawitacja jest jego przeciwieństwem – zawsze przyciąga, zawsze skupia materię. Jedno z wielkich pytań, którymi zajmowała się kosmologia, wiązało się z rozstrzygnięciem, czy grawitacja ostatecznie wygra i ściągnie Wszechświat z powrotem do punktu, co skończy się „Wielkim Kolapsem", czy też początkowa eksplozja Wielkiego Wybuchu była tak potężna, że Wszechświat będzie rozszerzał się wiecznie. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku kwestia ta stała się niemal całkowicie nieistotna, przesunięcia ku czerwieni odległych galaktyk bowiem ujawniły coś absolutnie nieoczekiwanego: ekspansja Wszechświata przyspiesza. Jakaś siła musi przeciwdziałać grawitacji, odpychając wszystkie obiekty coraz dalej i dalej od siebie. Siła ta znana jest pod nazwą „ciemnej energii", lecz jest to tylko etykieta dla czegoś na razie dla nas niezrozumiałego.

Einstein odkrył sposób, aby grawitacja mogła działać w sposób nieoczekiwany, gdy w 1917 roku dopracowywał ogólną teorię względności. Było to przed odkryciem innych galaktyk przez Hubble'a i na długo przed opublikowaniem teorii Wielkiego Wybuchu. W tamtym czasie panowała zgodna opinia, iż Wszechświat jest dość statyczny, czyli że obecnie wygląda tak samo, jak wyglądał miliardy lat temu. Nagle pojawił się problem: grawitacja ma tendencję do skupiania materii, a to zlepianie oznacza, że wraz ze zbliżaniem się wszystkiego do siebie Wszechświat powinien zmieniać swój wygląd. Tak więc Einstein postanowił dołączyć do równania ogólnej teorii względności dodatkowy parametr Λ, który nazwał stałą kosmologiczną. Miał on przeciwdziałać wywoływanemu przez grawitację efektowi skupiania materii i gwarantować, że Wszechświat będzie wyglądał przez cały czas identycznie.

Kiedy Hubble odkrył rozszerzanie się Wszechświata, Einstein porzucił ideę stałej kosmologicznej (nazywał ją później swą największą pomyłką). Tymczasem dzisiaj okazuje się, że ciemna materia zachowuje się właśnie tak, jak Einstein wyobraził to sobie w 1917 roku: ta tajemnicza siła, przeciwstawiająca się grawitacji, teraz zwiększa tempo ekspansji Wszechświata. Idea stałej kosmologicznej może być jednak słuszna, choć... jej wartość może nawet nie być stała, przyspieszenie ekspansji Wszechświata bowiem zaczęło się mniej więcej 7 miliardów lat temu. Jest ona obecnie kluczowym elementem Modelu Standardowego kosmologii, na który składa się ogólna teoria względności, ciemna energia (Λ), zimna ciemna materia (CDM) i zwykła materia (czyli gwiazdy, planety i my), znanego pod nazwą Λ-CDM. Model ten opisuje ewolucję Wszechświata od chwili Wielkiego Wybuchu do dnia dzisiejszego i ciemna energia zdecydowanie odgrywa w nim najważniejszą rolę. Najdokładniejsze przeglądy gwiazd i galaktyk mówią nam, że Wszechświat w 68 procentach składa się z ciemnej energii, 27 procent stanowi ciemna materia, a tylko 5 procent to zwykła materia, czyli to, co opisuje Model Standardowy fizyki cząstek.

Fizyka cząstek może jednak powiedzieć nam coś na temat ciemnej energii. Pole Higgsa zawiera energię i rozciąga się w całym Wszechświecie. Zasada nieoznaczoności stwierdza, że pętle kwantowe, pary cząstek i antycząstek, mogą powstawać i zaraz potem znikać nawet w całkowicie pustej przestrzeni. Mówiąc inaczej, na poziomie kwantowym pusta przestrzeń tak naprawdę nie jest pusta, toteż możliwe, że to właśnie ta energia przeciwstawia się grawitacji, wywołując efekt, który znamy jako ciemną energię. Przewidywana przez mechanikę kwantową wartość ciemnej energii różni się od rzeczywistości w dość szokujący sposób: chodzi o czynnik 10^{120}! Znamy to jako katastrofę próżni albo najgorsze przewidywanie teoretyczne w historii fizyki. Jeżeli zapytalibyście, ilu ludzi żyje na Ziemi, a ja odpowiedziałbym „siedmiu”, pomyliłbym się o czynnik równy miliard, czyli 10^9. Jeżeli zapytalibyście, ile jest gwiazd w całym Wszechświecie, a ja stwierdziłbym, że tylko jedna, pomyliłbym się o czynnik równy sto miliardów miliardów miliardów,

czyli 10^{29}. To jednak żadne pomyłki w porównaniu z rozminięciem się z faktami o czynnik 10^{120}, co jest spektakularnie fatalnym wynikiem. Tak fatalnym, że prawdopodobnie powinniśmy odczytać go jako wskazówkę, iż jesteśmy jeszcze bardzo daleko od zrozumienia, jak można by połączyć z sobą mechanikę kwantową i ogólną teorię względności. Znaczy to, że ciemna energia zapewne na jakiś czas pozostanie zagadką. To z kolei oznacza, że los Wszechświata również będzie nieznany – może ekspansja będzie trwać dalej w rosnącym tempie, przez co galaktyki i gwiazdy będą coraz bardziej od siebie odizolowane, a może ciemna energia znowu się „wyłączy", umożliwiając grawitacji ściągnięcie wszystkiego do jednego punktu. Nie dowiemy się dopóty, dopóki nie pojmiemy natury ciemnej materii.

Dlaczego cząstki są tak lekkie albo... dlaczego grawitacja jest tak słaba?

Tym sposobem dotarliśmy do wielkiego problemu, o którym wolimy nie pamiętać: jest nim grawitacja. Jest to zachodzące w naturze oddziaływanie, które z punktu widzenia codziennych doświadczeń życiowych jest dla nas najbardziej oczywiste, lecz wynika to jedynie z faktu, że siedzimy na wielkiej grudzie materii zwanej Ziemią. Dla pojedynczych cząstek grawitacja jest tak mizerna, że Model Standardowy całkowicie ignoruje jej istnienie.

Model Standardowy odnosi się do trzech oddziaływań o różnej mocy: oddziaływania silne są około 100 razy potężniejsze od elektromagnetyzmu, natomiast oddziaływania słabe plasują się gdzieś pośrodku pomiędzy nimi. Grawitacja jest znacznie słabsza niż jakiekolwiek oddziaływanie opisywane przez Model Standardowy. Nie jest słabsza o czynnik 100 ani 1000, ale o czynnik 10^{37} – jest to liczba zapisywana jedynką, po której występuje 37 zer. Jest tak słaba, że nawet gdyby w LHC dochodziło do miliardów zderzeń

protonów w każdej sekundzie każdego dnia, począwszy od Wielkiego Wybuchu, to i tak nigdy nie udałoby się dostrzec oddziaływania grawitacyjnego. Model Standardowy nie obejmuje grawitacji po prostu dlatego, że nic nie można o niej powiedzieć na podstawie badań cząstek. Zagadnienie to jest również znane jako problem hierarchii. Ewentualnie mówimy o tajemnicy, dlaczego grawitacja jest o tyle słabsza od wszystkich innych oddziaływań.

Pytanie to można zadać inaczej – dlaczego cząstki są tak lekkie? Gdyby wszystkie cząstki przenosiły więcej masy, wówczas zachodzące między nimi oddziaływania grawitacyjne byłyby równie powszechne jak oddziaływania elektromagnetyczne. Punkt, w którym efekty kwantowe i grawitacyjne są mniej więcej równe, jest nazywany skalą Plancka i wymaga ogromnej masy: około dziesięciu miliardów miliardów razy większej niż masa protonu (to mniej więcej 20 mikrogramów lub tyle, ile waży ziarnko piasku – dla nas niewiele, ale dla cząstek kolosalnie dużo). Dlaczego cząstki są tak dużo lżejsze od tej wielkości? Problem ten szczególnie uwidacznia się w odniesieniu do bozonu Higgsa. Bozon ów odgrywa wyjątkową rolę w generowaniu mas, toteż jakiekolwiek pętle pojawiające się w diagramach Feynmana wykazują tendencję do zwiększania jego masy. Nawet jeśli zaakceptujemy fakt, że wszystkie cząstki Modelu Standardowego są lekkie, to z powodu wspomnianych pętli bozon Higgsa wciąż powinien być skrajnie ciężki i lokować się gdzieś w pobliżu skali Plancka. Tymczasem tak nie jest.

Wydaje się, że są trzy skale, o których wiemy: neutrina, których masy są ułamkiem elektronowolta, reszta cząstek Modelu Standardowego, począwszy od elektronu i skończywszy na najcięższej cząstce, kwarku wysokim, których masy zawierają się w przedziale od 0,5 MeV do 173 GeV, oraz skala Plancka, dla której wartości sięgają 10^{19} GeV. Nie wiemy, dlaczego w naturze funkcjonuje taka struktura. Wielka luka między Modelem Standardowym cząstek a skalą Plancka może być pełna nowych, fascynujących obiektów albo jest tylko ogromną, nieciekawą pustynią energetyczną. LHC i inne eksperymenty wbijają się w tę pustynię, osiągając skale energii rzędu kilku TeV, jednak przed nami wciąż do

pokonania daleka droga. Pytanie brzmi, czy są tam jakieś oazy nowych cząstek, czy też na kolejne odkrycie przyjdzie nam poczekać bardzo, bardzo długo? Zagadki tego rodzaju nie dają fizykom spać po nocach.

Czy istnieje teoria wszystkiego?

Pytanie jeszcze większego kalibru dotyczy tego, co dzieje się w skali Plancka. Wszechświat musiał mieć swój początek w energii tego rzędu – prawdopodobnie nawet większej – gdy mechanika kwantowa i grawitacja odgrywały równe role. Nie mamy jednak pojęcia, jak miałoby to wyglądać, jak połączyć naszą aktualną teorię grawitacji (ogólną teorię względności) z mechaniką kwantową. Przez całe dekady fizycy teoretycy marzyli o przeprowadzeniu takiej unifikacji, co zapewne stanowiłoby rozwiązanie problemu hierarchii, odsłoniłoby prawdziwą naturę ciemnej energii i przyniosłoby nam prawdziwą teorię wszystkiego, albo przynajmniej wszystkiego, co do tej pory udało nam się poznać.

Na początku 2016 roku dowiedzieliśmy się czegoś nowego o grawitacji, gdy zespół zmodernizowanego obserwatorium LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), które właściwie jest złożeniem dwóch detektorów ze Stanów Zjednoczonych, jednego zlokalizowanego w Luizjanie i drugiego w Waszyngtonie, ogłosił, że po raz pierwszy w historii udało się zarejestrować fale grawitacyjne, których istnienie przewidział Einstein w swej ogólnej teorii względności, opublikowanej niemal dokładnie sto lat wcześniej. Fale grawitacyjne są zmarszczkami czasoprzestrzeni, kiedy więc przechodzi taka fala, czasoprzestrzeń zostaje zdeformowana: odległości między ciałami zwiększają się i zmniejszają. Fale grawitacyjne wykryte przez LIGO powstały w wyniku scalenia się dwóch czarnych dziur w jedną. Do tej konkretnej fuzji doszło w odległości 1,3 miliarda lat świetlnych od Ziemi, a więc 1,3 miliarda lat temu – tyle czasu potrzebowały podróżujące z prędkością światła fale grawitacyjne, aby do nas

dotrzeć. Liczby związane z tym zjawiskiem są oszałamiające: jedna z czarnych dziur miała masę 29 razy większą od naszego Słońca, druga 36 razy większą. Fale grawitacyjne zarejestrowane przez LIGO zostały wytworzone na ułamek sekundy przed połączeniem się czarnych dziur, a energia uwolniona w tym ułamku sekundy przewyższała wartością ogół energii wytworzonej w tym czasie przez resztę widzialnego Wszechświata. Jednak do czasu, gdy fale grawitacyjne dotarły do nas, wywołały zmarszczkę przestrzeni o rozmiarach mniej więcej jednej tysięcznej średnicy protonu. Wykrycie tak małych zmarszczek jest doprawdy niesamowitym osiągnięciem, dokonanym przez LIGO za pomocą wiązki laserowej. Wiązka dzielona jest na dwie części, które wysyłane są w dwóch różnych kierunkach wzdłuż detektora o długości 4 kilometrów, po czym ponownie łączone. Jakakolwiek zmiana długości detektora, wywołana przejściem fali grawitacyjnej, natychmiast uwidacznia się w połączonej wiązce laserowej w podobny sposób, jak słyszalne są harmoniki, gdy jeden z instrumentów jest nieco niedostrojony do drugiego. Po porównaniu sygnałów z dwóch detektorów okazało się, że oba zarejestrowały tę samą, niepozorną zmarszczkę, co było porównywalne z dostrzeżeniem po drugiej stronie galaktyki obiektu, który przemieścił się o jeden metr. Był to decydujący dowód. Po tej pierwszej obserwacji LIGO powinien rejestrować po kilka podobnych zjawisk rocznie, otwierając tym samym całkiem nowe okno na Wszechświat – nie ma innego sposobu badania zderzających się czarnych dziur!

O ile ogólna teoria względności opiera się na pojęciu krzywizny czasoprzestrzeni, o tyle mechanika kwantowa bazuje na idei, zgodnie z którą występują tylko określone, dyskretne wartości wielkości fizycznych. Kiedy przyglądamy się światłu z bliska, okazuje się, że tworzą je pojedyncze cząstki – fotony. Kwantowa teoria grawitacji powiedziałaby nam, że to samo dotyczy fal grawitacyjnych: jeśli moglibyśmy przyjrzeć im się z bardzo bliska, przekonalibyśmy się, że tworzą je pojedyncze cząstki, bozony grawitacji kwantowej, nazywane grawitonami. Pierwsze zarejestrowane przez LIGO fale grawitacyjne dokładnie odpowiadają przewidywaniom ogólnej teorii względności; nie widać, aby potrzebny był wkład teorii kwantowej,

od kiedy jednak fale grawitacyjne stały się w końcu dostępne obserwacjom, z pewnością jesteśmy o krok bliżej dokonania postępu.

Równocześnie wiemy, jak działa mechanika kwantowa, i za jej pomocą poprawnie opisujemy wszystkie inne oddziaływania, dlaczego więc choćby dziś nie możemy napisać kwantowej teorii grawitacji? Przede wszystkim istnieje różnica pojęciowa. Mechanika kwantowa zawsze rozgrywa się na tle czasoprzestrzeni, podstawowej struktury Wszechświata. Cząstki poruszają się i oddziałują, zawsze mając za sobą tę gładką scenografię. Problem w tym, że scenografią jest sama ogólna teoria względności. Jej treść opowiada o tym, jak materia i energia zakrzywiają czasoprzestrzeń, natomiast kwantowa teoria grawitacji mówiłaby o tym, że czasoprzestrzeń jest „skwantowana", czyli dzieli się na dyskretne jednostki. Stwierdzenie, iż materia występuje w porcjach – cząstkach – w sposób fundamentalny różni się od stwierdzenia, iż w porcjach występuje przestrzeń. To jak badać chmury na tle bladoniebieskiego nieba i nagle uświadomić sobie, że niebo wcale nie jest fizycznie istniejącym bytem, lecz tylko zbiorem fotonów rozpraszanych przez atomy.

Załóżmy, że zdołamy to sobie wyobrazić: możliwe jest zbudowanie kwantowej teorii grawitacji spójnej z innymi oddziaływaniami Modelu Standardowego. Do pewnego punktu wszystko działa dobrze, ale gdy tylko grawitacja zaczyna mieć znaczenie – w pobliżu skali Plancka – teoria się załamuje. Działania matematyczne w grawitacji kwantowej dają wyniki nieskończone, lecz teraz już nawet metody renormalizacji nie poprawiają sytuacji. Nieskończoności nie znikają. Możliwe, że potrzebne jest całkowicie odmienne podejście, zupełnie nowy zestaw pojęciowy kwantowego świata, zanim rzeczywiście uda się sformułować kwantową teorię grawitacji, teorię wszystkiego.

Poza Model Standardowy

Taki jest obecny stan fizyki cząstek. Świat subatomowy rozumiemy w pełni, ale ciemna materia stanowi dowód, że są jeszcze inne cząstki. Natomiast grawitacja jest oddziaływaniem, które nie pasuje do funkcjonujących modeli. Czy musimy na nowo napisać prawa mechaniki kwantowej? A może ciemna energia mówi nam, że powinniśmy od nowa napisać prawa rządzące grawitacją? Te otwarte pytania sprawiają, że jest to fascynujący moment, zwłaszcza iż szukamy teraz sposobów na połączenie świata subatomowego z wielkoskalowymi strukturami Wszechświata – to domena astrofizyki cząstek. Możliwe, że odpowiedzi na część tych pytań znajdziemy dość szybko, jednak niektóre z problemów, takie jak grawitacja kwantowa, jeszcze długo mogą pozostać nierozwiązane. Dla fizyka doświadczalnego jest to czas, jakiego jeszcze w historii nauki nie było: teraz jakiekolwiek nowe odkrycie może autentycznie prowadzić do kolejnej wielkiej rewolucji w naszym pojmowaniu. Ostatnie dwa rozdziały tej książki opowiadają o niektórych pomysłach na to, jakie może być to nowe odkrycie i gdzie można będzie go dokonać.

ROZDZIAŁ 10

TUTAJ ZACZYNA SIĘ REWOLUCJA

Model Standardowy jest kompletny i pięknie działa – dopóty, dopóki nie przestaje działać. Widzimy we Wszechświecie dowody na jego zawodność: brak antymaterii, problem hierarchii, ciemna materia, ciemna energia i tak dalej. Do rozwiązania niektórych z tych problemów potrzebujemy nowej fizyki, fizyki, której dotąd nie widzieliśmy. Ani w eksperymentach z promieniowaniem kosmicznym w pierwszej połowie XX wieku, ani w coraz potężniejszych od tamtej pory doświadczeniach z wykorzystaniem akceleratorów cząstek. Nie zobaczyliśmy jej nawet w bardzo czułych detektorach neutrinowych, poszukujących najrzadszych spośród oddziaływań, ani w żadnym innym z niezliczonych, rozsianych po całym świecie eksperymentów fizyki cząstek, które dokonują precyzyjnych pomiarów.

Problemy w Modelu Standardowym są tak różnorodne, że trudno powiedzieć, czy poszukujemy wielu różnych zjawisk, czy też jednego odkrycia, które je wszystkie rozwiąże. Pomysłów, rzecz jasna, nie brakuje i w tym rozdziale opiszę niektóre z najważniejszych teorii, główne kandydatki na kolejną rewolucję w fizyce.

Supersymetria

Wyjaśnia: strukturę Modelu Standardowego, problem hierarchii, ciemną materię)

Muszę zacząć od supersymetrii, ponieważ to szczególnie uwielbiana, a zarazem szczególnie znienawidzona teoria fizyki cząstek. Dla jednych odkrycie, że supersymetria nie istnieje, byłoby jednym z najbardziej zaskakujących wniosków na temat Wszechświata. Inni nie mogą się doczekać, żeby tę teorię obalić i iść dalej.

Model Standardowy jest zbudowany na symetriach. U podstaw sił natury leżą symetrie cechowania, natomiast inne, takie jak symetria CP, rządzą zachowaniem cząstek. Przyglądając się temu, jak skonstruowany jest Model Standardowy, zauważymy, że możliwych jest kilka innych symetrii. Tak mówi matematyka, lecz nie wiemy jeszcze, czy symetrie możliwe z matematycznego punktu widzenia rzeczywiście istnieją w naturze. A supersymetria, jak sama nazwa wskazuje, to naprawdę duża rzecz.

Na świecie są dwa rodzaje cząstek. Fermiony – elektrony, kwarki i tak dalej – tworzą całą materię. Następnie są bozony – fotony, gluony i tak dalej – które przenoszą oddziaływania. Supersymetria (od tej pory SuSy) czyni rzeczy, cóż, bardziej symetrycznymi, stwierdzając, że jest to tylko połowa opowieści. Według niej każda cząstka ma swojego „superpartnera". Istnieje bozon – superpartner dla każdego fermionu i fermion – superpartner dla każdego bozonu. SuSy wprowadza pełną kopię Modelu Standardowego, lecz zamiast wymyślać całkiem nowe nazwy zdecydowano, że superpartnerzy fermionów zyskają na początku literę „s" (tak, od słowa „super"): elektron i selektron, kwark i skwark, a superpartnerzy bozonów przyrostek „-ino" (naprawdę nie wiem dlaczego). Tym sposobem bozon W ma superpartnera wino, a bozon Higgsa superpartnera higgsino.

W świetle matematyki Modelu Standardowego SuSy jest możliwa, co po części stanowi jej uzasadnienie, gdyż wydaje się, że każda symetria, która jest możliwa, znajduje swoje odbicie w naturze. Częściowo zaś jej uzasadnienie bierze się z estetyki. SuSy likwiduje podział na dwa typy cząstek, czyniąc matematykę prostszą i piękniejszą. Może się to wydawać dziwną linią rozumowania, ponieważ piękno jest jednym z tych zjawisk, które trudno zdefiniować, lecz gdy je widzimy, to o tym wiemy. Piękno często służyło fizykom za kryterium przewodnie w budowaniu nowych idei:

Einsteinowi podczas tworzenia relatywistyki i Diracowi, gdy postanowił potraktować swoje równanie wystarczająco poważnie, by przewidzieć istnienie antymaterii. Innymi słowy, jeżeli SuSy jest możliwa i czyni wszystko schludniejszym, to naprawdę powinna istnieć. W przeciwnym wypadku natura najwyraźniej zadziałałaby wbrew swoim obyczajom, czyniąc równania brzydszymi, i musielibyśmy wyjaśnić, dlaczego tak się stało.

Jednak SuSy przynosi również bardziej wymierne korzyści, a pierwszą z nich jest wyjaśnienie masy bozonu Higgsa. Problem w tym, że oddziaływania między bozonem Higgsa a cząstkami Modelu Standardowego (pętle) powinny czynić masę bozonu Higgsa coraz większą i większą, daleko wykraczającą poza wartość, którą faktycznie znamy z pomiarów. Gdyby SuSy istniała, oddziaływania między bozonem Higgsa a cząstkami SuSy dałyby przeciwny efekt: sprawiłyby, że masa bozonu Higgsa byłaby niższa. Te dwa efekty znosiłyby się wzajemnie, przez co masa bozonu Higgsa całkiem rozsądnie plasowałaby się na poziomie porównywalnym z masą innych cząstek Modelu Standardowego. Problem rozwiązany.

SuSy może również wyjaśnić istnienie ciemnej materii. Najlżejsze cząstki SuSy byłyby stabilne w taki sam sposób, jak robi to elektron. Po prostu nie ma nic lżejszego, na co mogłyby się rozpaść. Gdyby nie przenosiły ładunku elektrycznego i miały dostatecznie dużą masę, byłyby doskonałymi kandydatkami na poszukiwane cząstki WIMP ciemnej materii. Kolejny problem rozwiązany.

SuSy sugeruje również, że w wysokich energiach Model Standardowy staje się znacznie prostszy. To jedno z marzeń teorii wszystkiego, by połączyć różne siły Modelu Standardowego w jedną. Gdzieniegdzie to już się dokonało: elektryczność i magnetyzm są dwiema stronami tej samej monety, a oddziaływania elektromagnetyczne i słabe zostały związane z sobą za pomocą mechanizmu Higgsa. Jeżeli wszystkie oddziaływania mają być z sobą zjednoczone, to w pewnym punkcie wszystkie muszą mieć tę samą siłę, a SuSy sprawia, że tak się dzieje. W wysokich energiach oddziaływanie silne staje się słabsze (swoboda asymptotyczna, o której mówiłem w rozdziale 4), podczas gdy słabe faktycznie urasta w siłę. SuSy nieco tę ewolucję podrasowuje, sprawiając, że

trzy oddziaływania zbiegają się w tym samym punkcie. W warunkach wysokiej energii o pewnej, określonej wartości wszystkie oddziaływania Modelu Standardowego są równie silne. Nie wiemy, czy to rzeczywiście jest istotne, a biorąc pod uwagę skrajnie wysokie energie, w jakich to się dzieje, możemy nigdy się nie dowiedzieć, lecz z całą pewnością wynika z tego, że oddziaływania są z sobą w jakiś sposób związane i wiele prób zbudowania teorii wszystkiego faktycznie wymaga istnienia supersymetrii.

Teoretycznie rzecz biorąc, SuSy jest przekonująca. Może też być kusząca dla eksperymentatorów, ponieważ daje całe spektrum nowych cząstek, które można odkryć i zbadać. Tu jednak pojawia się problem – otóż cząstki supersymetryczne powinny mieć taką samą masę jak ich partnerki z Modelu Standardowego, a skoro tak, już dawno powinniśmy je znaleźć. Tymczasem, mimo dziesięcioleci poszukiwań, żadna nie została odkryta i nie mamy w tej chwili najmniejszego bezpośredniego dowodu, że SuSy istnieje. Gra skończona. Jeżeli teoria dokonuje przewidywań, a przewidywania te okazują się fałszywe, teoria powinna trafić do kosza.

Jednak to nie koniec historii SuSy. Spotkaliśmy się już z przykładem symetrii, która nie działała tak, jak przewidywano: bozony W i Z są znacznie cięższe niż foton, ponieważ mechanizm Higgsa łamie symetrię oddziaływania słabego. Coś podobnego mogło się zdarzyć w wypadku SuSy, symetria mogła zostać złamana; uczyniło to wszystkie supercząstki znacznie cięższymi niż ich partnerki z Modelu Standardowego i, jak dotąd, ulokowało je poza naszym zasięgiem.

Ta możliwość wszystko komplikuje, lecz w SuSy jest przestrzeń dla takich zdarzeń. Istnieje całe mnóstwo wersji SuSy, które osiągają ten cel na różne sposoby: minimalny supersymetryczny Model Standardowy (MSSM), ograniczony minimalny supersymetryczny Model Standardowy (cMSSM) oraz następny minimalny supersymetryczny Model Standardowy (NMSSM). Poza tym istnieje SuSy z czterema bozonami Higgsa, split-SuSy, SuSy z łamaniem parzystości R, łamanie SuSy przenoszone przez oddziaływania cechowania, grawitację lub anomalie. I tak dalej. Teoria SuSy zajmuje myśli fizyków już od dawna i wielu z nich spędziło mnóstwo czasu na badaniu wszystkich możliwości.

W istocie jest tyle opcji, że SuSy tak naprawdę może robić cokolwiek. Model Standardowy ma 26 parametrów swobodnych, 26 liczb, których nie możemy przewidzieć, a które po prostu musimy zmierzyć. Niektóre wersje SuSy mają ich ponad 100. Ponad 100 liczb, które decydują o tym, jak będą się zachowywać cząstki supersymetryczne. Zatem tak, SuSy przewiduje mnóstwo dodatkowych cząstek, lecz które z nich, jeśli w ogóle któreś, mają szansę pojawić się podczas eksperymentów? Jakie byłyby ich własności? Czy SuSy rzeczywiście mogłaby wyjaśnić zagadkę ciemnej materii? Cóż, to kwestia ustawienia tych wszystkich pokręteł. Równie dobrze można powiedzieć, że każdy może wygrać w mistrzostwach świata, wszystko zależy od tego, jak będą grały poszczególne zespoły – to prawda, ale w niczym nie jest pomocna. Skutkiem ubocznym tego, że SuSy może przewidzieć niemal wszystko, jest fakt, iż ostatecznie nie przewiduje niemal niczego.

I to jest faktyczny powód, dla którego SuSy tak długo żyje. Ilekroć eksperyment nie znajduje najmniejszego śladu supercząstek, wystarczy nieznacznie dostosować niektóre z tych parametrów swobodnych, by okazało się, że poszukiwane supercząstki są tylko odrobinę cięższe, tylko ciut poza zasięgiem. Nigdy nie precyzując, nigdy się nie mylimy. Ta gra w kotka i myszkę trwa już ponad czterdzieści lat.

Bieg wydarzeń może jednak ulec zmianie, ponieważ w 2015 roku LHC zaczął zderzać protony z energią 13 TeV i możemy zacząć poszukiwania ekstremalnie ciężkich cząstek. Oczywiście, jeśli nadal nie odkryjemy SuSy, ona wciąż może istnieć, ale w praktyce staniemy przed nowym problemem hierarchii. Będziemy potrzebowali kolejnej teorii, która wyjaśni, dlaczego cząstki SuSy tak znacznie przewyższają masą cząstki Modelu Standardowego. Być może więc, wobec przytłaczającego braku dowodu, nadejdzie czas, by teorię SuSy w końcu porzucić. Supersymetria może się okazać kolejną piękną teorią, która ulegnie brzydkim faktom, o czym przekonamy się w ciągu najbliższych pięciu lat.

Monopole magnetyczne

Wyjaśniają: strukturę Modelu Standardowego

Między elektrycznością a magnetyzmem zachodzi ciekawa różnica. Cząstki mogą przenosić indywidualne ładunki elektryczne: elektron jest naładowany ujemnie, a proton dodatnio. Natomiast magnesy zawsze występują w parach. Weźmy taki magnes sztabkowy – ma biegun północny i biegun południowy, które są ekwiwalentem dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych. Lecz gdy przekroimy taki magnes na pół, nie otrzymamy osobnego magnesu „północnego" i osobnego „południowego". Powstaną dwa mniejsze magnesy sztabkowe, wciąż z dwoma biegunami, północnym i południowym. Kontynuujmy przecinanie, a będziemy otrzymywać coraz to mniejsze magnesy. Nie da się wyodrębnić pojedynczego bieguna północnego czy południowego, czyli tak zwanych monopoli magnetycznych.

Monopole magnetyczne przypominają nieco SuSy. Gdyby istniały, uczyniłoby to równania Modelu Standardowego prostszymi i piękniejszymi, toteż uwzględnia je wiele kandydatek na teorię wszystkiego. Być może zatem rzeczywiście powinniśmy się zastanowić, dlaczego dotąd ich nie znaleźliśmy. Najlepszym wytłumaczeniem wydaje się fakt, że są one ekstremalnie ciężkie, zdecydowanie zbyt ciężkie, by dało się je wytworzyć w LHC. Możliwe, że pewna ich liczba przetrwała we Wszechświecie od czasów Wielkiego Wybuchu, lecz jak dotąd okazały się nieuchwytne... o ile w ogóle istnieją.

Nowe siły, nowe cząstki

Wyjaśniają: strukturę Modelu Standardowego, problem łamania CP w oddziaływaniach silnych, ciemną materię

SuSy i monopole badają pewne możliwości ukryte w istniejącym Modelu Standardowym. Oczywiście, wiele można również do niego dodać.

Jednym z oczywistych rozwiązań jest dodanie nowych sił natury. Oddziaływania w Modelu Standardowym oparte są na symetriach cechowania, z ładunkiem jednowymiarowym (podobne do elektromagnetyzmu), dwuwymiarowym (oddziaływanie słabe) i trójwymiarowym (oddziaływanie silne). Może istnieć więcej oddziaływań: dlaczego nie dodać czterowymiarowego, pięciowymiarowego lub...? Wszystko jest możliwe, niemniej jednak musi istnieć powód, dla którego nie zauważyliśmy ich dotąd w żadnym eksperymencie – aczkolwiek oddziaływania silne i słabe dostarczają tu pewnych modeli.

Nowe oddziaływanie może być tak samo ograniczone jak oddziaływanie silne, mamy nawet jednego kandydata, znanego jako „technikolor". To oddziaływanie, które może się ujawnić w zderzeniach wysokoenergetycznych, gdy niektóre cząstki, uważane przez nas za fundamentalne, zaczną się rozpadać, podobnie jak to było z protonem, który w 1968 roku został rozbity na kwarki. Ewentualnie, podobnie jak oddziaływanie słabe, nowa siła może mieć ekstremalnie ciężki bozon, który dałoby się wykryć w pewnych rzadkich i mocno tłumionych interakcjach, tak samo jak bozon W, który po raz pierwszy ujawnił się w rozpadzie beta. Wreszcie bozon nowej siły mógłby po prostu nieczęsto wchodzić w interakcje. Jedna z idei rozwiązania problemu łamania CP w oddziaływaniach silnych uwzględnia nową siłę przenoszoną przez bozon (znany jako aksjon), który jest lekki, lecz niewiarygodnie trudny do wykrycia – i stanowi kolejnego kandydata na cząstkę ciemnej materii WIMP.

Istnieje również możliwość, że ciemna materia to więcej niż jeden rodzaj cząstki. Być może w kosmosie znajduje się cały „ciemny sektor", zawierający bogaty i różnorodny zbiór cząstek, niczym równoległa kopia Modelu Standardowego. Jednak żadna z tych cząstek nie przenosi ładunków Modelu Standardowego (elektrycznego, kolorowego lub słabego), a żadna cząstka Modelu Standardowego nie przenosi „ciemnych ładunków", wobec czego obydwie strony po prostu z sobą nie rozmawiają. To dziwny pomysł

– wokół nas może być cały świat, równoległy do naszego, a my zwyczajnie nie potrafimy go zobaczyć! A jeśli ten równoległy ciemny sektor rzeczywiście nie oddziałuje z cząstkami Modelu Standardowego, to niezwykle trudno byłoby go wykryć.

Niektóre modele unifikują znane nam siły w większe 5- lub 10-wymiarowe grupy. Siły, które znamy obecnie, są tylko różnymi stronami owych większych grup, a my niczym archeolodzy zeskrobaliśmy ledwie powierzchnię tego, co pod spodem. Gdybyśmy potrafili kopać wystarczająco głęboko, czy też sięgnąć wystarczająco wysokich energii, przekonalibyśmy się, że te siły w gruncie rzeczy są połączone. Niektóre większe modele unifikujące wszystkie znane siły zawierają bozon, który wygląda jak cięższy bozon Z (bozon Z′) lub cięższy bozon W (bozon W′). Inne przewidują kolejną generację fermionów lub cząstki w rodzaju leptokwarków, które są skrzyżowaniem typów cząstek, jakie już znamy. To wszystko jest możliwe, ale czy cokolwiek z tego istnieje? No cóż, znowu nie mamy na to bezpośredniego dowodu.

Dodatkowe wymiary

Wyjaśniają: problem hierarchii, wielką unifikację

Teraz więc szukamy pomysłu na uczynienie Modelu Standardowego bardziej kompletnym (jak SuSy) lub na wykorzystanie go w charakterze wzorca dla czegoś nowego (na przykład dodatkowych symetrii cechowania), ale są również pomysły na całkowitą zmianę reguł. Zazwyczaj robi się to, próbując się uporać ze słoniem w salonie: grawitacją.

Pierwszy przykład stanowiłby potencjalne wyjaśnienie problemu hierarchii, czyli odpowiadał na pytanie, dlaczego grawitacja jest tak słaba. To dodatkowe wymiary. Żyjemy w świecie czterowymiarowym. Są trzy wymiary przestrzeni, każdy odpowiadający unikatowemu kierunkowi: góra–dół, lewa–prawa, przód–tył. Jest również czwarty wymiar, czas, aczkolwiek nie wydaje się, byśmy mieli jakąś kontrolę

nad tym, jak poruszamy się w czasie. Wszystkie znane nam siły i cząstki obracają się w tych czterech wymiarach, a co, jeśli jest ich więcej? Co, jeśli grawitacja wydaje się tak słaba w naszym czterowymiarowym świecie, ponieważ jej większa część wycieka do piątego, szóstego, a nawet większej liczby wymiarów?

Najpierw musimy rozwiązać ten sam stary problem: jeżeli te dodatkowe wymiary są realne, to dlaczego nigdy nie możemy ich zobaczyć? Skoro istnieją, to coś musiało się z nimi stać. Jedną z możliwości jest zwinięcie (kompaktyfikacja) do rozmiarów zbyt małych, żeby dało się je zauważyć. Już próby wyobrażenia sobie tego, jak mogłyby wyglądać dodatkowe wymiary, potrafią, w najlepszym razie, przyprawić o ból głowy, a co dopiero, jeśli są one zwinięte. Skłaniam się do myślenia o nich w kategoriach linii brzegowej. Widziany na zdjęciu satelitarnym lub na mapie odcinek wybrzeża wygląda dość prosto: długie, płaskie, stosunkowo równe fragmenty plaży okazjonalnie przerywane rzeką lub zatoką. Zróbcie powiększenie, a wszystko staje się bardziej skomplikowane. Na plażach jest więcej szczegółów, uwidaczniają się mniejsze strumienie, i tak dalej. Stańcie na plaży, a zobaczycie całkiem inną warstwę struktury. Woda wiruje w tę i z powrotem wokół kamieni oraz w górę i w dół na różnych innych przeszkodach. Ten poziom uszczegółowienia jest niewidoczny, gdy oglądacie płaskie zdjęcie satelitarne, jednak dla piechura to ogromna różnica, czy spaceruje wzdłuż gładkiej plaży, czy wdrapuje się na skalisty klif. Dodatkowe wymiary mogą być niczym skały i kamienie wzdłuż wybrzeża – zbyt małe, by odgrywać ważną rolę we Wszechświecie, który widzimy – naszym odpowiedniku płaskiego zdjęcia z satelity. Jednak powodem, dla którego grawitacja wydaje się o tyle słabsza od innych oddziaływań, może być fakt, że musi ona przedzierać się przez te skały i kamienie, wszystkie zwinięte dodatkowe wymiary, tracąc na to większość swojej mocy.

Alternatywą dla kompaktyfikacji jest scenariusz świata bran. Wyobraźcie sobie, że nasz cały czterowymiarowy Wszechświat jest tylko jednym z pięter w wielopiętrowym budynku. Mogą być inne brany, inne wszechświaty, które tworzą pozostałe piętra. Oto na czym polega sztuczka: Model Standardowy pracuje tylko na jednym

piętrze, lecz grawitacja może swobodnie przemieszczać się schodami w górę i w dół, włócząc się po całym budynku. Ja pracuję w kilkupiętrowym biurowcu i znacznie częściej widzę osobę, która siedzi obok mnie w biurze, niż strażnika, który patroluje całość. Załóżmy, że grawitacja wydaje się słabsza, ponieważ obejmuje cały budynek, podczas gdy inne siły są ograniczone do jednego piętra. Wówczas, podobnie jak w wypadku kompaktyfikacji, większa część sił grawitacji znika w tych dodatkowych wymiarach.

Istnieje wiele wersji teorii dodatkowych wymiarów, z których najstarsze powstały w latach dwudziestych ubiegłego wieku, w tym teoria Kaluzy–Kleina, próbująca zunifikować elektromagnetyzm i grawitację w pięciowymiarowym Wszechświecie. Ponowne zainteresowanie tymi ideami pod koniec XX wieku doprowadziło do powstania modelu Randall–Sundruma, modelu ADD, modeli odwołujących się do cechowania, modeli z dużymi dodatkowymi wymiarami, zakrzywionymi dodatkowymi wymiarami i wielu innych. Każdy z tych modeli ma inną siłę i rozwiązuje problem grawitacji w inny sposób, lecz wszystkie wykorzystują dodatkowe wymiary. Każdy z nich dałby też inny efekt w LHC: nowy ciężki bozon (lub całą ich serię), energię „znikającą" w dodatkowych wymiarach albo jakieś nowe oddziaływania cząstek.

Jeżeli możliwe jest stworzenie kwantowej teorii grawitacji, z dodatkowymi wymiarami lub bez nich, to mogą też istnieć kwantowe czarne dziury. Czarne dziury z reguły powstają, gdy kończąca życie masywna gwiazda zapadnie się pod wpływem grawitacji. W miarę jak coraz więcej i więcej masy gwiazdy skupia się na małym obszarze, siła grawitacji rośnie, aż wreszcie staje się tak duża, że nic nie może stamtąd uciec, nawet poruszający się z prędkością światła foton. Kwantowa czarna dziura to subatomowa wersja tego obiektu, która zniknęłaby niemal natychmiast po powstaniu, wyparowując w deszczu nowych cząstek. Takie zdarzenie w LHC dałoby dość spektakularną i unikatową sygnaturę, na przykład wystrzeliwując mnóstwo bozonów W.

Jednak to nie dlatego większość ludzi uważa, że pomysł wytworzenia w Szwajcarii czarnej dziury jest interesujący. W 2008 roku grupa obywateli wszczęła kampanię prawną przeciwko

włączeniu LHC z obawy, że Wielki Zderzacz Hadronów mógłby wyprodukować czarną dziurę i zniszczyć świat. Ta historia, oprócz „boskiej cząstki", jest prawdopodobnie jedną z najczęściej przywoływanych opowieści, gdy mówię komuś o tym, że pracuję w CERN. A przecież dokonano poważnego, naukowego przeglądu możliwości zniszczenia świata, ale w końcu, gdyby zderzenia cząstek w wysokiej energii mogły przyczynić się do powstania niszczycielskiej czarnej dziury, zdarzyłoby się to już dawno temu. LHC przeprowadza zderzenia w najwyższych energiach, jakie osiągnięto w laboratorium, ale poza laboratorium to nic specjalnego – często dochodzi do zderzeń w znacznie wyższych energiach, na przykład gdy w atmosferę ziemską uderza promieniowanie kosmiczne. Proces sądowy zakończył się konkluzją, że możliwe korzyści naukowe dalece przewyższają ewentualne ryzyko, a jeśli czytacie te słowa, to znaczy, że LHC jeszcze nie zniszczył całego świata.

Teoria strun i fizyka cząstek bez cząstek

Wyjaśnia: wielką unifikację, ciemną energię i cokolwiek innego zechcecie

Jest kilka teorii opartych na pozbyciu się przyjętej idei cząstek. Pojawiają się w nich tak dziwne twory jak *unparticles* (dosłownie „niecząstki"), które wydają się zawsze takie same, niezależnie od tego, jak blisko im się przyglądamy, lub kameleony, które zmieniają swoje właściwości w zależności od tego, co znajduje się w ich sąsiedztwie. Jednak najsłynniejsza teoria tego rodzaju zastępuje cząstki strunami. Teoria strun pojawiła się w latach siedemdziesiątych XX wieku i przez pewien czas wydawała się bardzo obiecująca. Obecnie, słusznie lub nie, obwiniana jest o zmarnowanie lat pracy badawczej i pieniędzy, które nie doprowadziły do stworzenia niczego użytecznego.

Idea ta jest prosta. Cząstki, zamiast być jakimiś dziwacznymi tworami w postaci nieskończenie małych punktów, byłyby obiektami

o skończonym rozmiarze – czymś w rodzaju krótkiego kawałka struny czy też tyciej pętelki, takiej jak elastyczna gumka recepturka, o długości mniej więcej 10^{-35} metra lub jednej miliardowej z jednej miliardowej części rozmiarów protonu. Teoria strun ma wiele pozytywnych aspektów: w sposób naturalny opisuje grawitację i unifikuje wszystkie siły Modelu Standardowego. Nieskończoności, które trapiły mechanikę kwantową, zanim pojawiły się techniki renormalizacji, tutaj się nie pojawiają – po części dlatego, że nie sprowadzamy już wszystkiego w dół, do skali nieskończenie małej kropki. Niestety, teoria strun wymaga diabelnie trudnej matematyki – występuje też w kilku różnych wersjach. Przełom nastąpił w 1995 roku, gdy wykazano, że to tylko różne sposoby wyrażenia tej samej idei, którą nazwano M-teorią. Nadal jednak nie jest jasne, czym właściwie ta M-teoria jest.

Ogólnie rzecz biorąc, teoria strun wymaga supersymetrii i dodatkowych wymiarów (w sumie 11), zatem jeżeli nie odkryjemy tego w LHC, zaakceptowanie teorii strun będzie trudniejsze. Problem z SuSy, a zarazem jej przewaga, polega na tym, że może ona występować w niemal każdej energii, nawet więc jeśli nie znajdziemy jej w LHC, z pewnością nie obali to teorii strun.

W istocie teoria strun w tak znikomym stopniu wiąże się z czymkolwiek, co moglibyśmy przetestować eksperymentalnie, że skłaniam się raczej ku traktowaniu jej jako dziedziny matematyki niż fizyki. Część kryjącego się za teorią strun aparatu matematycznego okazała się pożyteczna w innych dziedzinach – jedną z nich jest opis plazmy kwarkowo-gluonowej – jednak to nie to samo co przewidywania formułowanie przez samą teorię strun. I to również jedna z przyczyn obecnej krytyki: po czterdziestu pięciu latach pracy wciąż daleko jej do teorii dającej się zweryfikować eksperymentalnie. Z jednej strony to chyba żadna niespodzianka, jako że teoria strun w gruncie rzeczy odnosi się tylko do skali Plancka, która daleko odbiega od czegokolwiek, do czego moglibyśmy zdobyć dostęp w eksperymentach, a być może w ogóle gdziekolwiek we Wszechświecie. Z drugiej strony myślę, że jeśli naprawdę mamy zdobyć jakieś wskazówki na temat tego, co się dzieje w skali

Plancka, oraz czy teoria strun to właściwa odpowiedź, to potrzebujemy znacznie więcej informacji, więcej odkryć eksperymentalnych w rejonach bliższych energii, które potrafimy osiągnąć.

Najlepszy ze wszystkich możliwych światów?

Wyjaśnia: niewiarygodnie niskie prawdopodobieństwo istnienia Wszechświata

Ten rozdział w całości poświęcony jest poszukiwaniom głębszego wyjaśnienia. Teorii, która odpowiedziałaby na niektóre otwarte pytania w fizyce cząstek, a być może nawet samej teorii wielkiej unifikacji, ostatecznej instrukcji obsługi Wszechświata. Jednak istnienie takiej teorii rodzi pewne interesujące kwestie, ponieważ gdy rozejrzymy się w otaczającym nas Wszechświecie, nasza obecność tutaj wydaje się dość mało prawdopodobna.

Problem tkwi w parametrach swobodnych, 26 liczbach, których nie potrafimy jeszcze wyjaśnić. Na przykład gdyby bozon W był nieco lżejszy, Słońce wypaliłoby się na długo przedtem, zanim moglibyśmy wyewoluować. Gdyby oddziaływanie elektromagnetyczne było nieco silniejsze, fuzja w jądrach gwiazd nie doprowadziłaby do powstania węgla – katastrofa dla nas, form życia opartego na węglu. Gdyby nie było mechanizmu Higgsa, cząstki byłyby pozbawione masy i śmigałyby po Wszechświecie z prędkością światła – nie powstałyby atomy, ponieważ grawitacja nie byłaby w stanie skupić wszystkiego, by uformować gwiazdy. Jakkolwiek by na to spojrzeć, parametry Modelu Standardowego wydają się precyzyjnie wyważone. Już drobna zmiana niemal każdego z nich, nieznaczne zwiększenie lub zmniejszenie jego wartości, dałaby dramatyczne efekty – i prawie zawsze prowadziła do istnienia Wszechświata, który jest zimny, ciemny i pusty. Gdyby parametry swobodne Modelu Standardowego były kontrolowane przez leżącą u ich podstaw głębszą teorię, dałoby się uznać, że istnieją jakieś fundamentalne powody, dla których

Wszechświat jest taki, jaki jest. Toteż próby nadania temu jakiegoś sensu stanowią jedną z najbardziej fascynujących form aktywności w fizyce.

W tym miejscu istotne jest sprecyzowanie przyczyny i skutku, ponieważ nie jest to wywód na rzecz czegoś w rodzaju inteligentnego projektu. Trawa nie istnieje po to, by jadły ją krowy. To krowy ewoluowały w taki sposób, by jeść trawę, bo trawa jest dostępna. Stałe fundamentalne nie zostały dobrane w taki sposób, by mogły powstać atomy, rozpalić się gwiazdy, a w 13 miliardów lat po Wielkim Wybuchu na jednej z wielu miliardów planet we Wszechświecie mógł ewoluować człowiek. Tak się po prostu zdarzyło, że stałe fundamentalne wyprodukowały Wszechświat, w którym wszystko to było możliwe. A gdyby się okazało, że stałe fundamentalne są ściśle narzucone przez jakąś głębiej ukrytą teorię, powinniśmy prawdopodobnie uważać, iż nasze istnienie do pewnego stopnia było nieuniknione, a do pewnego spowodowane łutem szczęścia.

Alternatywnie być może parametrów swobodnych nie tłumaczy żadna głębiej ukryta teoria, a ich wartości są po prostu losowe. Inaczej mówiąc, we Wszechświecie nie ma nic nieuniknionego, a my istniejemy przez przypadek. To jedna z możliwości, lecz tak nieprawdopodobna, że trudno traktować ją poważnie. Dla przykładu posłużę się masą bozonu Higgsa. W poprzednim rozdziale wspomniałem, że pewne pętle kwantowe powinny windować masę bozonu Higgsa do bardzo wysokich wartości. Cóż, niewykluczone, że wszystkie te krążące w pętlach duże liczby wzajemnie się równoważą, dając bozonowi Higgsa masę zbliżoną do masy innych cząstek. Jednak by nabrać wyobrażenia, jak bardzo jest to nieprawdopodobne, przyjrzyjmy się cenom akcji koncernu motoryzacyjnego Forda, zaczynając od czasów jego powstania w 1903 roku. Od tamtej pory zaszły wielkie zmiany: dwie wojny światowe, wielki kryzys, kryzys naftowy w 1973 roku, wzrost popularności SUV-a na początku XXI wieku i kryzys finansowy w 2008 roku. Teraz wybierzcie losowo dwa różne dni z tego okresu i przyjrzyjcie się cenom akcji w południe każdego z nich. Oczywiście, mogą być takie same, z dokładnością do ułamka centa, ale to

z pewnością jest mało prawdopodobne. Szanse na to, że liczby w pętlach Higgsa przypadkiem się zrównoważą, są jeszcze niższe.

To prowadzi do idei naturalności. Jeżeli teoria, chcąc zbudować taki Wszechświat, jaki widzimy wokół siebie, musi polegać na przesadnym „precyzyjnym dostrojeniu", czyli serii szalenie mało prawdopodobnych zdarzeń, to jest szalenie mało prawdopodobne, że ta teoria jest poprawna. Wróćmy do przykładu SuSy – technicznie rzecz biorąc, supersymetria wciąż może istnieć, nawet jeśli LHC jej nie znalazł, ale to zaczyna wyglądać bardzo „nienaturalnie". Żeby cząstki SuSy mogły być bardzo ciężkie, wiele parametrów musiałoby przyjąć niezwykle precyzyjnie dobrane wartości – i właśnie ta rosnąca zależność od precyzyjnego dostrojenia powoduje, że wielu ludzi może się z SuSy wycofać.

Tak więc parametry swobodne w Modelu Standardowym albo są zdeterminowane przez leżącą u ich podstaw teorię, albo są całkowicie losowe. Żaden z tych scenariuszy nie jest szczególnie satysfakcjonujący, ponieważ Wszechświat, w którym żyjemy, sprawia wrażenie tak mało prawdopodobnego – tak precyzyjnie dostrojonego. Jednak istnieje alternatywa. Fundamentalne parametry mogą być przypadkowe, lecz w żadnym razie nie precyzyjnie dostrojone. Możemy żyć w Wieloświecie.

Wieloświat to, cóż, wiele światów – być może nawet nieskończenie wiele. Wielki Wybuch, który dał początek naszemu Wszechświatowi, może być jednym z niezliczonej liczby innych, a w każdym z tych odrębnych wszechświatów fundamentalne parametry mogą mieć inne wartości. Wobec dostatecznej liczby wszechświatów jest nieuniknione, że znajdzie się wśród nich taki, który będzie wyglądał akurat tak jak nasz. Nieco mniej zagmatwana wersja tego pomysłu zakłada, że jest tylko jeden Wszechświat, ale znacznie większy, niż nam się wydaje. W tym ogromnym Wszechświecie fundamentalne parametry zmieniają się w zależności od miejsca i na pewnym obszarze są takie jak nasze.

W obydwu ideach, zarówno Wieloświata, jak i Wszechświata „patchworkowego", możemy zastosować tak zwaną zasadę antropiczną. Mówi ona, że nie ma nic szczególnego w naszym Wielkim Wybuchu czy naszym kawałku Wszechświata, ale również

nie ma nic zaskakującego w tym, że my wyewoluowaliśmy w miejscu, gdzie fundamentalne parametry mają takie wartości – gdyby były choć nieznacznie inne, nie byłoby nas tutaj, by się nimi cieszyć. Nawet mimo niskich szans wygranej na loterii, jeśli dostatecznie dużo ludzi kupi los, jest niemal nieuniknione, że ktoś gdzieś zgarnie wygraną – i tak oto żyjemy sobie w zwycięskim wszechświecie.

Proszę obstawiać...

Wszystkie opisane w tym rozdziale teorie mają swoje mocne i słabe strony, w tym momencie jednak nie potrafimy stwierdzić, która z nich – jeśli w ogóle któraś – jest słuszna. Mnóstwo czasu spędzono na sprawdzaniu ich przewidywań drogą eksperymentalną, jak dotąd bez efektu. Z naukowego punktu widzenia oznacza to po prostu, że musimy kontynuować poszukiwania, a dane w końcu wskażą nam właściwą odpowiedź. Tymczasem, być może, chcielibyście wiedzieć, co ja o tym myślę.

Przede wszystkim należałoby zapytać, które z tych teorii są testowalne, i tu odpowiedź jest jasna. SuSy, dodatkowe wymiary i niektóre nowe cząstki lub siły natury – wszystkie może wykryć LHC. Monopole mogą być poza naszym zasięgiem, a teoria strun tak dalece poza naszym zasięgiem, że trudno sobie wyobrazić jakikolwiek sposób na jej przetestowanie.

A zatem którą bym wybrał? Trudno mi uwierzyć, że rzeczywiście jesteśmy blisko znalezienia teorii wszystkiego. Wydaje się, że przepaść między tym, co możemy obecnie testować – „skalą elektrosłabą” około 1 TeV – a skalą Plancka jest tak ogromna, iż czeka nas tam jeszcze niejedno odkrycie. Z tego powodu byłbym bardzo rozczarowany, gdyby to SuSy była naszym następnym objawieniem. Chociaż dostrzegam jej uroki, supersymetria wydaje się aż nazbyt schludna. I obiecuje rozwiązanie tylu problemów, że praktycznie nie zostałoby nam już nic do zrobienia – jakby jedyne, czego nam trzeba, to SuSy, a potem jeszcze tylko teoria strun.

Jednakże gdyby SuSy rzeczywiście została obalona (co, ku mojemu rozczarowaniu, również wydaje się niemożliwe), wymagałoby to naprawdę radykalnego przebudowania wielu idei wielkiej unifikacji. To właśnie ten rodzaj niespodzianki, którym natura zaskakiwała nas w przeszłości, i jedna z wielu niespodzianek, jakie, mam nadzieję, czekają na nas w przyszłości.

Spośród pozostałych kandydatek, kusząca wydaje mi się idea dodatkowych wymiarów. Wymaga „zmiany reguł" i jest bardziej radykalna, a przy tym dodaje Wszechświatowi głębi i tajemniczości. To właśnie taki rodzaj idei zmieniającej zasady gry, jaki, mam nadzieję, gdzieś tam na nas czeka. Jeśli chodzi o teorię strun i Wielościwiat, trudno mi jako eksperymentatorowi wypowiedzieć się na ten temat. Być może pewnego dnia dowiemy się, czy teorie te są prawdziwe, ale wątpię, by nastąpiło to w niedalekiej przyszłości. W odniesieniu do teorii strun dowód doświadczalny musiałby mieć charakter pośredni, podobny do sposobu, w jaki Pauli przewidział istnienie neutrina – niewidzialna cząstka miała zbilansować energię w rozpadzie beta. Możliwe, że w ostatecznym rozrachunku teoria strun okaże się jedynym sposobem na wytłumaczenie takich zjawisk jak precyzyjne dostrojenie we Wszechświecie lub grawitacja kwantowa. Sądzę jednak, że w tej chwili znajdujemy się daleko od punktu, w którym teoria strun okaże się jedyną możliwą odpowiedzią.

Co prowadzi nas z powrotem do tezy, którą rozpocząłem tę książkę: teraz potrzebujemy nowych danych eksperymentalnych. Nowego odkrycia w LHC czy gdziekolwiek indziej. Czegoś, co wskaże nam właściwy kierunek, ponieważ zmierzamy ku niezbadanym terytoriom. Nadchodzące lata będą rozstrzygające i w następnym rozdziale opowiem o eksperymentach, które testują granice naszych możliwości w poszukiwaniu czegoś nowego.

ROZDZIAŁ 11

W POSZUKIWANIU PIĘKNA

Nauka nie jest zbiorem suchych faktów, wykazem rzeczy, które wiemy na temat świata. Nauka to trwający proces. Jej celem jest zdobywanie nowych informacji. Wkraczanie na nieznane obszary, budowanie nowego obrazu, formułowanie nowej teorii na temat tego, co może się wydarzyć, a później testowanie tej teorii. Nauka to zadawanie pytań i szukanie odpowiedzi. Sekret wielkich odkryć naukowych tkwi w tym, by we właściwym czasie postawić właściwe pytanie.

Wiemy, że w fizyce cząstek istnieje wiele poważnych kwestii, problemów, których nie sposób rozwikłać za pomocą Modelu Standardowego. Mamy dużo nowych teorii, dzięki którym próbujemy rozwiązać te problemy, i sprawdzamy ich słuszność – przeprowadzamy nowe eksperymenty, zbieramy dane i konfrontujemy teorie z pomiarami. Musimy jednak znaleźć właściwe pytanie. Nie może być nazbyt ogólne, na przykład takie: czy ciemna materia składa się z cząstek supersymetrycznych? Konieczne jest rozbrojenie problemu i znalezienie pytania, które w większym stopniu będzie podatne na testowanie: jeśli ciemna materia składa się z cząstek SuSy, to znaczy, że SuSy musi istnieć. Skoro SuSy istnieje, wówczas musi być wiele cząstek SuSy – po jednej na każdą cząstkę Modelu Standardowego. Jeżeli wszystkie cząstki SuSy istnieją, to powinniśmy móc je znaleźć. Tak więc zamiast pytać, czy materia składa się z cząstek SuSy, powinniśmy na początek zapytać, czy w ogóle można znaleźć jakiekolwiek dowody na istnienie SuSy.

To samo dotyczy każdej innej teorii: dodatkowych wymiarów, technikoloru, grawitacji kwantowej i tak dalej. Jest wiele teorii, a my

chcemy przetestować każdą z nich. Co się tyczy eksperymentów, możemy być pragmatyczni. Czymkolwiek ostatecznie okaże się nowa fizyka, przyjdą wraz z nią nowe cząstki i nowe oddziaływania. Pierwszy krok w testowaniu jakiejkolwiek teorii, obowiązkowy dla wszystkich, polega na znalezieniu nowej cząstki lub jakichś cząstek spośród tych, o których już wiemy, że robią niezwykłe rzeczy. Właśnie to robimy teraz w LHC i w wielu mniejszych eksperymentach na całym świecie. Treść tego rozdziału koncentruje się na omówieniu zagadnień naukowych, będących podstawą dla niektórych prowadzonych obecnie eksperymentów, motorem napędowym nieustającego poszukiwania ukrytego piękna Wszechświata i nowej fizyki, która może je objaśnić.

Polowanie na garb 2

Najbardziej oczywistą oznaką nowej fizyki jest nowa cząstka. Natomiast najlepszym sposobem znalezienia nowej cząstki jest szukanie tam, gdzie do tej pory nie szukano: w wyższych zakresach energii. LHC zaczął swój drugi etap działania w 2015 roku i obecnie energia zderzenia protonów wynosi 13 TeV. To najwyższa energia, jaką kiedykolwiek udało się uzyskać w warunkach laboratoryjnych, i ogromny postęp względem rekordu z pierwszego etapu działania akceleratora, który wynosił 8 TeV. Polowanie na nową fizykę trwa.

W rozdziale 7 opisałem podstawowe zagadnienia związane z taką pracą badawczą – sprowadza się to do polowania na garb. Najprawdopodobniej jakakolwiek nowa cząstka będzie podlegała niemal natychmiastowemu rozpadowi i trzeba ją będzie zrekonstruować z produktów tego rozpadu. Oznacza to, że zaczniemy przyglądać się zderzeniom charakteryzującym się pewnymi własnościami, na przykład dwóch fotonów, których suma mas jest równa masie nowej cząstki. Jeżeli znajdziemy skupisko takich zderzeń – garb – znajdziemy nową cząstkę.

Podczas polowania na cząstkę Higgsa teoria z grubsza mówiła nam, czego mamy szukać, co pomogło zawęzić obszar poszukiwań.

Aktualnie chcemy testować dużo, mnóstwo teorii, toteż ATLAS i CMS są zaangażowane w ponad sto różnych poszukiwań garbów dla wielu różnych rodzajów zderzeń: dwóch fotonów, dwóch elektronów, dwóch mionów, wielu elektronów, mionów i dżetów, dżetów z brakującą energią (oznaka neutrina) – sięgamy po wszystko, co tylko można sobie wyobrazić, zarzucając sieci możliwie najszerzej, aby złapać cokolwiek, co tam jest.

Każde z tych poszukiwań musi radzić sobie z innym tłem, zatem różne procesy również mogą prowadzić do wytworzenia dwóch elektronów, dwóch fotonów itd., przez co analizy są mocno uzależnione od teoretycznych przewidywań dotyczących tych procesów. Jest jeszcze inna komplikacja: zaglądanie w tak wiele miejsc zwiększa ryzyko wywołania fałszywych alarmów – zagadnienie to jest znane jako „problem porównań wielokrotnych", choć w fizyce cząstek nazywamy je „efektem *look-elsewhere*". Z przypadkowości zderzeń wynika, że czasami wydarzenia tła mogą zwyczajnie przypadkiem trafić do skupiska, przyczyniając się do powstania czegoś, co wygląda jak garb. Rzut monetą również może dać pięć razy z rzędu ten sam wynik – jest to mało prawdopodobne, ale może się zdarzyć. Tym razem jednak prowadzimy nie jedno, lecz ponad sto poszukiwań, co znaczy, że jest całkiem prawdopodobne, iż w jednym z nich natkniemy się gdzieś na fałszywy garb. Rzućmy setką monet i niemal na pewno jedna z nich pięć razy z rzędu upadnie orłem do góry, ale nie znaczy to, że odkryliśmy coś nowego.

Są różne sposoby zmierzenia się z tym problemem, ale żelaznym standardem jest wymóg poziomu ufności „5σ", w którym σ określa, jak bardzo liczba zderzeń tła może się wahać w górę lub w dół. Garb, który jest pięć razy większy od σ, ma takie rozmiary, że istnieje zaledwie jedna szansa na 3,5 miliona trafień, aby mógł on być wytworem przypadkowego nakładania się sygnałów tła. Jest to równoważne sytuacji, gdy rzucona moneta ląduje orłem do góry dwadzieścia dwa razy z rzędu – można ją rzucać setki, a nawet tysiące razy, a taki wypadek wciąż jest mało prawdopodobny. Tak więc trzeba znaleźć garb wysokości 5σ, potwierdzić go w innym eksperymencie i... mamy odkrycie!

W 2013 roku, pod sam koniec pierwszego etapu pracy akceleratora, trwały poszukiwania nowej ciężkiej cząstki, ulegającej rozpadowi na bozon W i bozon Z, przewidywanej przez kilka teorii. Poszukiwania koncentrowały się na zdarzeniach, w których każdy z nich rozpadał się na kwark i antykwark, co prowadziło do powstania łącznie czterech dżetów. Dodanie do siebie dżetów ujawniło niewielką zbitkę wydarzeń, mały garb, sugerujący istnienie nowej cząstki o masie zbliżonej do 2 TeV. Poziom ufności tego garbu wynosił 3,4σ – za mało, aby obwieścić, że dokonano odkrycia, lecz z pewnością wart był tego, aby poświęcić mu więcej uwagi. Tak się złożyło, że w tym czasie akurat przypadał początek dwuletniej przerwy w pracy akceleratora, który miał przejść modernizację, musieliśmy więc cierpliwie zaczekać na sprawdzenie danych. Było to mordercze wyczekiwanie. Kiedy w 2015 roku LHC rozpoczynał drugi etap pracy, napięcie sięgało zenitu – czy identyczny garb pokaże się również teraz? Niestety, na razie nie ma po nim najmniejszego śladu. Weźcie monetę, która pięć razy z rzędu upadła orłem do góry, i rzucajcie dalej – jeśli tylko nie ma nic niezwykłego w samej monecie, prędzej czy później liczba orłów i reszek się wyrówna. Niewielkie garby pojawiają się i znikają, spodziewamy się zobaczyć jeszcze kilka z nich, zanim ogłosimy dokonanie jakiegokolwiek odkrycia. Jeżeli jednak pokaże się prawdziwy garb, będzie to początek rewolucji.

Ukrywanie się na widoku

Nawet kiedy już znajdziemy garb, wciąż jeszcze jest dużo do zrobienia. Następny krok polega na rozszyfrowaniu, co odpowiada za ten efekt, która z wielu teorii potrafi go opisać. Przesuwamy się od odkrycia ku zrozumieniu.

Właściwie proces ten wciąż trwa dla garbu, który został już przez LHC wykryty, czyli dla bozonu Higgsa. Czy rzeczywiście jest to cząstka przewidywana przez Model Standardowy? A może to supersymetryczny partner bozonu Higgsa? Albo coś całkiem

nowego? Pierwsze doniesienia w 2012 roku były nacechowane ostrożnością: odkryliśmy nową cząstkę o masie 125 GeV. Żadnej wzmianki o bozonie Higgsa, ponieważ nie wiedzieliśmy wtedy, jakie są przyczyny powstania garbu. Po upływie kolejnych sześciu miesięcy i wykonaniu jeszcze większej liczby pomiarów sformułowano komunikat, iż nowa cząstka „jest zgodna z bozonem Higgsa". Po następnych sześciu miesiącach analizy danych opublikowano śmielsze oświadczenie, iż znaleźliśmy „bozon Higgsa, zgodny z Modelem Standardowym".

Z pewnością większość fizyków spodziewała się, że cząstka ta istnieje, jednak po dostarczeniu takiego prezentu przez LHC wciąż musieliśmy rozpakowywać pudełko i sprawdzać, co jest w środku. Model Standardowy powiedział nam wiele na temat cząstki Higgsa: nie powinna mieć ładunku elektrycznego (potwierdzono), nie powinna mieć spinu (potwierdzono), powinna nadawać masę wszystkim pozostałym cząstkom Modelu Standardowego – ta kwestia wciąż pozostaje otwarta i stanowi jedno z zagadnień, nad którymi pracuję.

Dokonaliśmy pomiarów rozpadu bozonu Higgsa na fotony, bozony Z i bozony W. Pozostaje pytanie, czy rozpada się on też na fermiony – mówiąc inaczej, czy mechanizm Higgsa nadaje masę również cząstkom materii, kwarkom i leptonom?

W Modelu Standardowym masy fermionów określane są przez siłę, z jaką oddziałują one z polem Higgsa: im większa siła, tym większa masa. Jest to również prawdziwe dla cząstki Higgsa i oznacza, że najprawdopodobniej ulega ona rozpadowi na najcięższe cząstki. Kwark wysoki jest za ciężki – bozon Higgsa o masie 125 GeV musiałby „pożyczyć energię" za pośrednictwem zasady nieoznaczoności, aby móc rozpaść się na kwark wysoki i antykwark, każdy z nich o masie 173 GeV. Największe szanse dostrzeżenia oddziaływania Higgsa z fermionami mamy w wypadku drugiej i trzeciej cząstki na liście najcięższych: kwarka niskiego i taonu.

Właściwie bozon Higgsa powinien w ok. 58 procentach zderzeń ulegać rozpadowi na parę: kwark niski i antykwark niski, tymczasem nigdy jeszcze tego nie zaobserwowaliśmy. Problem ma głównie naturę eksperymentalną: LHC nieustannie wytwarza kwarki i gluony,

jest więc niemal niemożliwe, aby znaleźć drobny dodatkowy wkład wnoszony przez bozon Higgsa. Za kilka lat będziemy mieli dostatecznie dużo danych, aby to zrobić, lecz konieczne będzie wykorzystanie wszystkich sztuczek stosowanych przez analityków danych. Nieco łatwiejsza jest analiza taonu i całkiem niedawno wykryto pierwszy wyraźny ślad tego rozpadu. Jeśli jednak przekonamy się, że bozon Higgsa ulega rozpadowi na kwarki niskie częściej, niż się spodziewaliśmy – albo nawet gdy nie uda nam się tego rozpadu w ogóle zarejestrować – powie nam to, że odkryty przez nas bozon Higgsa jest czymś znacznie bardziej interesującym niż cząstka przewidziana przez Model Standardowy. Możliwe, że jest on jednym z bozonów Higgsa przewidywanych przez supersymetrię – może już znaleźliśmy SuSy, tylko nie zdaliśmy sobie z tego sprawy.

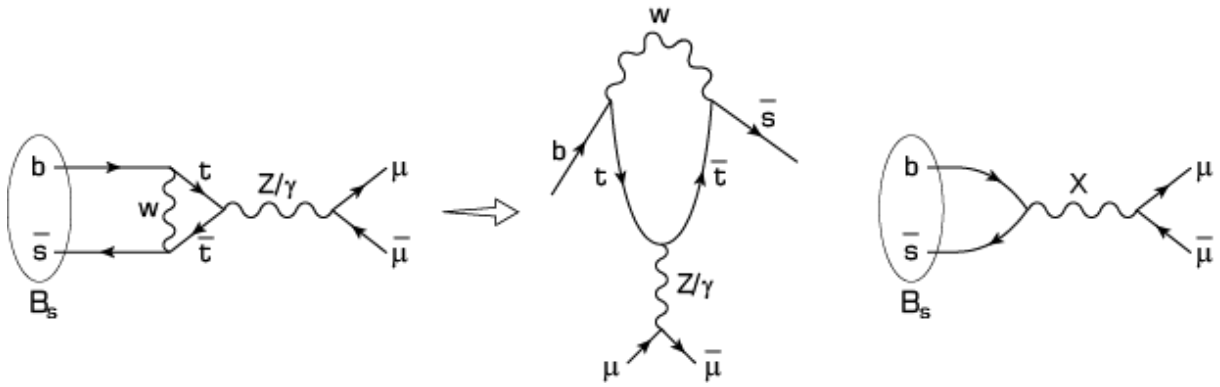
Zakazane pingwiny

LHC nie zajmuje się tylko polowaniem na garb i bozon Higgsa. Istnieje szerokie spektrum innych zagadnień naukowych, w odniesieniu do których stosuje się podejście oparte na wykonywaniu precyzyjnych pomiarów. Badania te koncentrują się na szukaniu luk w Modelu Standardowym, wyławianiu wszystkiego, co niezwykłe. Czy chromodynamika kwantowa wciąż opisuje zachowanie kwarków i gluonów w wyższych energiach, osiąganych przez LHC po modernizacji drugiego etapu? Czy bozony cechowania można rozbić na mniejsze cząstki? Bliższe przyjrzenie się znanym cząstkom może przynieść odkrycie nowych informacji.

Metoda precyzyjnych pomiarów może być jeszcze potężniejszym narzędziem niż polowanie na garb; dobrym przykładem jej mocy jest odkrycie oddziaływania słabego. Pierwsze sygnały pojawiły się wraz z rozpadem beta, który zamienia kwark dolny w kwark górny i wytwarza elektron – procesu tego nie dało się wytłumaczyć w świetle wiedzy na temat jakiegokolwiek znanego wówczas oddziaływania, toteż musiał on angażować całkowicie nową siłę natury. Jeżeli zobaczymy coś w LHC, coś zabronionego przez reguły

Modelu Standardowego, będzie to oczywisty sygnał, że natrafiliśmy na coś nowego. Na przykład na pingwiny.

Historia ta ma swój początek w 1977 roku. Niedawno został odkryty kwark niski i teoretyk John Ellis opracowywał w CERN artykuł, w którym opisywał pewne bardziej niezwykłe, możliwe przykłady rozpadu tej cząstki. Jak większość artykułów z zakresu fizyki cząstek, praca ta również zawierała diagramy Feynmana, ilustrujące ów konkretny proces – z tym że te diagramy wyglądały nieco inaczej. Może nawet trochę... ptasio. Ellis przegrał w trakcie gry w rzutki zakład z eksperymentatorką Melissą Franklin, w efekcie musiał zawrzeć w swojej pracy słowo „pingwin". Nie było łatwo. Znalazł rozwiązanie – trzeba było obrócić jeden z diagramów.



Po lewej rozpad $B_S \to \mu\bar{\mu}$ z Modelu Standardowego, który następnie został przerysowany w taki sposób, aby wyglądał jak pingwin (mniej więcej). Po prawej przykład tego, jak nowa fizyka może zmienić tę reakcję.

Ten „pingwini diagram" jest przykładem czegoś, co w Modelu Standardowym jest niemal zabronione: rozpad hadronu B_S (kwark niski i kwark antydziwny) na mion i antymion. Proces ten jest podobny do rozpadu beta pod tym względem, że jest możliwy jedynie dzięki zasadzie nieoznaczoności. Przedstawione na diagramie cząstki wirtualne są znacznie cięższe niż cokolwiek innego biorącego udział w reakcji – rozpad beta uwalnia zwykle kilka MeV energii, znacznie mniej niż 80 GeV potrzebne do wytworzenia bozonu W. Wobec tego energia musi być „pożyczana" i gigantyczna wartość tej

pożyczki sprawia, że proces zachodzi rzadko. Na pingwinim diagramie widać pętlę z udziałem bozonu W i kwarków wysokich, co oznacza, że potrzebna jest jeszcze większa pożyczka energii, a proces staje się niesamowicie rzadki. Jeśli jednak zastąpić bozon W i kwarki wysokie jakimiś cząstkami SuSy albo zastąpić cały diagram znacznie prostszym, w którym wystąpią cząstki z innej, nowej teorii, to może się okazać, że właściwie nic nie stoi na przeszkodzie, aby proces zachodził częściej. Gdybyśmy zaobserwowali, iż hadrony B_S często rozpadają się na miony, byłby to oczywisty znak, że natrafiliśmy na nową fizykę, a ponieważ energia potrzebna do wytworzenia nowych cząstek na diagramie Feynmana może być pożyczana za pośrednictwem zasady nieoznaczoności, pomiar ten jest czuły na bardzo ciężkie cząstki, na nową fizykę, która znajduje się daleko poza zasięgiem polowania na garb.

Po dziesięcioleciach poszukiwań, w 2013 roku eksperymenty LHCb i CMS przyniosły wyniki pozwalające ogłosić, iż zaobserwowano ten nieuchwytny rozpad B_S, jednak jego częstotliwość odpowiada bardzo, bardzo małej wartości, przewidywanej przez Model Standardowy. Nowa fizyka nie poprawia osiągów. Jest to tylko jeden przykład na to, jak czułe stały się eksperymenty, jak wyciskamy z danych każdy najdrobniejszy strzęp informacji, każdą możliwą wskazówkę pokazującą, co może znajdować się za Modelem Standardowym.

W innych miejscach pojawiły się jednak pęknięcia. Pomiar B_S jest zaledwie jednym z wielu poszukiwań rzadkich procesów opisywanych przez pingwinie diagramy i innych sposobów, w jakie nowa fizyka może wpływać na zachowanie cząstek. LHCb dokonał pomiaru częstotliwości, z jaką zachodzi rozpad innego hadronu B, którego produktem są albo taony, albo miony. Model Standardowy mówi, że oba te rozpady zachodzą z jednakowym prawdopodobieństwem, tymczasem pomiary pokazują, że jeden z nich zdarza się częściej niż drugi – z poziomem ufności 3,9σ. Nie jest to może 5σ, potrzebne do ogłoszenia odkrycia, ale wynik wydaje się bardzo ciekawy. Również w tym wypadku dane pozyskane w drugim etapie powinny

odpowiedzieć na pytanie, czy rzeczywiście natknęliśmy się na pierwszy ślad nowej fizyki.

Zwiększanie precyzji

Poza LHC wykonuje się wiele różnorodnych eksperymentów, ukierunkowanych na inne pomiary, prowadzone w celu sprawdzenia wielkości obecnych w Modelu Standardowym, które znamy z największą dokładnością. Jeżeli mamy znaleźć coś niezwykłego, to właśnie tutaj.

Ekstremalnie rzadkim procesem jest rozpad protonu. Proton jest dość ciężki w rodzinie cząstek – około 1 GeV – ale w Modelu Standardowym zwyczajnie nie ma mechanizmu, który zezwalałby na rozpad protonu. Nie ma diagramu Feynmana, którym można by ów proces opisać. We wnętrzu pewnych niestabilnych jąder atomowych korzystniejsze dla protonu może być przejście rozpadu beta, który zamieni go w nieco cięższy neutron, ale w ogólności protony są całkowicie stabilne. Wprowadźmy trochę nowej fizyki i może się to zmienić.

Sprawdzenie, czy proton może ulegać rozpadowi, zasadniczo wymaga umieszczenia dużej liczby protonów we wnętrzu detektora i czekania na bardzo rzadkie zjawisko: jeden z nich zmieni się w inne cząstki. Poszukiwanie bardzo rzadkich zjawisk jest czymś, do czego świetnie nadają się ogromne detektory neutrinowe, a najczulszych do tej pory pomiarów dokonano w Super-Kamiokande, opisanym w rozdziale 8, który zawiera około 50 000 ton czystej wody – jest tam mnóstwo protonów! Jeżeli protony ulegają rozpadowi, to jest to losowy proces podlegający regułom mechaniki kwantowej: niektóre rozpadną się szybko, inne wolniej, a przeciętny czas życia cząstki będzie gdzieś pośrodku. Gdy więc w pewnym przedziale czasu w ogóle nie rejestruje się rozpadów, można powiedzieć, że średni czas życia protonu musi być dużo, dużo dłuższy, a skoro nigdy nie zaobserwowano ich rozpadu, wynik z Super-Kamiokande wskazuje,

iż średni czas życia protonu musi przekraczać 10^{34} lat – dla porównania Wszechświat ma teraz tylko $13{,}8 \times 10^{9}$ lat! Niesamowita stabilność protonu to dobra nowina dla atomów, z których sami jesteśmy zbudowani, chociaż okazała się mordercza dla wielu teorii wielkiej unifikacji – kiedy ktoś wpada na genialny pomysł, musi bardzo uważać, aby nie przewidywać wystąpienia oddziaływania, w którym proton ulega rozpadowi.

Prowadzi się wiele innych eksperymentów opartych na precyzyjnych pomiarach: szukamy rzadkich rozpadów mionów, rzadkich rozpadów kaonów, neutrin sterylnych i neutrin Majorany, o których wspomniałem w rozdziale 8, a także wiele, bardzo wiele innych projektów. Ażeby dać pewne wyobrażenie o różnorodności, krótko przybliżę kilka z nich. Znajdujący się w LHC Monopole and Exotics Detector (MoEDAL) wraca do idei klisz fotograficznych używanych w latach czterdziestych XX wieku do badania promieniowania kosmicznego, ale zastępuje te klisze arkuszami plastyku. Po jakimś czasie arkusze są „wywoływane" metodą wytrawiania chemicznego, co ujawnia ślady po cząstkach, które przebiły się przez tworzywo – poszukiwana jest charakterystyczna sygnatura monopoli magnetycznych, powstających w zderzeniach blisko detektora. W prowadzonym w CERN eksperymencie AEGIS wytwarzane są antyatomy celem sprawdzenia, czy reagują na pole grawitacyjne Ziemi w taki sam sposób jak zwykłe atomy, czy też może są odpychane. Poszukuje się aksjonów w doświadczeniach z wykorzystaniem światła laserowego do oświetlania ściany (naprawdę – foton może zamienić się w aksjon, przelecieć przez ścianę, a potem z powrotem zamienić się w foton), a zbudowane w Fermilabie urządzenie nazywane holometrem stanowi próbę wykrycia kwantowego „szumu holograficznego" albo zmarszczek czasoprzestrzeni, które mogą wynikać z grawitacji kwantowej.

Ostatni, o którym wspomnę, to „g-2", czyli pomiar momentu magnetycznego mionu. Miony, jak wszystkie fermiony, obracają się, a obrót ten, w połączeniu z obecnością ładunku elektrycznego, sprawia, że wytwarzane jest pole magnetyczne. Wszystkie fermiony zachowują się jak malutkie magnesiki. Moment magnetyczny, g, jest

wielkością charakteryzującą siłę tego malutkiego magnesu. Powinien mieć wartość około 2, wartość g-2 więc powinna wypadać blisko zera. W rozdziale 2 napomknąłem o tym, że moment magnetyczny elektronu to wielkość, która jest wyznaczona w elektrodynamice kwantowej z najwyższą dokładnością, a sama elektrodynamika kwantowa jest najprecyzyjniejszą teorią w całej nauce – dzięki temu okazuje się niezwykle czuła na nową fizykę, która mogłaby tę wartość nieco zmieniać. Mion ma większą masę od elektronu, co dodatkowo może wzmacniać efekty jakiegokolwiek nowego oddziaływania – wynika z tego, że jest to dobry kandydat na bohatera jakiegoś odkrycia.

Jeżeli umieści się miony w polu magnetycznym, to będą się one lekko chybotać, trochę jak igła kompasu, kołysząc się to w jedną, to w drugą stronę, zanim ustawi się wzdłuż linii pola magnetycznego Ziemi. Jednak, jak w wypadku pingwinów lub rozpadu protonu, nowa ciężka cząstka mogłaby wpływać na interakcje mionu z zewnętrznym polem magnetycznym, czyniąc efekt kołysania nieco poważniejszym niż się spodziewano. Mierząc występujący efekt kołysania, można wydobyć wartość g-2 i – być może – znaleźć ślad nowej fizyki.

Doświadczenie takie przeprowadzono w latach 1997–2001 w Brookhaven National Laboratory na Long Island w stanie Nowy Jork. Miony kołysały się bardziej niż zakładano. Pomiar różnił się od wartości oczekiwanej o współczynnik 3,6σ, czyli był niemal równie wyraźny, jak sygnał rzadkiego rozpadu B w LHC, lecz wciąż za słaby, aby ogłosić dokonanie odkrycia. Eksperyment osiągnął jednak granice czułości i potrzebnych byłoby znacznie więcej mionów, aby poprawić dokładność pomiaru. Tak więc w 2013 roku doświadczenie przeniesiono tam, gdzie miony można wytwarzać: do Fermilabu w stanie Illinois. Sercem eksperymentu jest gigantyczny magnes kolisty o średnicy 15 metrów. Zapakowano go na barkę, którą popłynął do Zatoki Meksykańskiej i dalej, najpierw rzeką Missisipi, a potem systemem kanałów Illinois, aby ostatecznie trafić na ciężarówkę zmierzającą prosto do Fermilabu – cała podróż liczyła ponad 5000 kilometrów. Zmodernizowany sprzęt powinien lada chwila wznowić pomiary, toteż na przestrzeni kilku następnych lat będziemy wiedzieć, czy wyniki uzyskane w Brookhaven są rzeczywistym sygnałem nowej fizyki, czy też nie.

Poszukiwanie śladów nowej fizyki odbywa się na wiele sposobów, od polowań na garb przez pingwiny do precyzyjnych pomiarów. I choć na razie nie ma jednoznacznych wyników, są wskazówki, nowe cząstki i dziwne zachowania, które mogą być pierwszym sygnałem zbliżającej się rewolucji. Jest też coś jeszcze, o czym wiemy, że musi gdzieś tam czekać na odkrycie: ciemna materia.

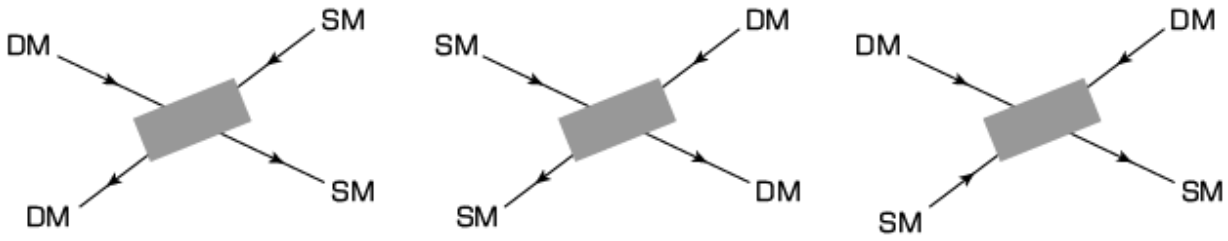
Polowanie na ciemność

Poszukiwanie ciemnej materii dość wyraźnie różni się od szukania SuSy, dodatkowych wymiarów lub potwierdzenia jakiejkolwiek innej teorii. W wypadku SuSy najpierw była teoria: zgrabny sposób rozszerzenia Modelu Standardowego, bazujący na pięknie matematyki. W wypadku ciemnej materii najpierw były dane: pomiary wielkości opisujących galaktyki przyniosły wyniki, które można wytłumaczyć tylko obecnością jakiejś nowej, nieznanej

cząstki. Wiemy, że to coś tam jest, musimy jedynie wykombinować, co to takiego. I musimy dokonać tego na drodze pomiarów wykonywanych w laboratorium.

W oczy rzuca się duże podobieństwo między ciemną materią a neutrinami. Pierwsza wskazówka dotycząca istnienia tych cząstek miała charakter wniosku wysnutego pośrednio z obserwacji rozpadu beta – ginęła gdzieś część energii. Wykrycie neutrin bezpośrednio w prowadzonym eksperymencie jest szalenie trudne, kiedy jednak już się to udało, obserwacje przyniosły kilka niespodzianek. Cały materiał dowodowy w sprawie ciemnej materii ma charakter poszlakowy, od krzywych rotacji galaktyk po soczewkowanie grawitacyjne. Dokonanie pomiaru bezpośrednio w eksperymencie również jest szalenie trudne, ale prowadzone obecnie prace mogą w najbliższym czasie przynieść pozytywne efekty i – miejmy nadzieję – również ujawnią więcej niespodzianek.

Uda nam się wykryć ciemną materię tylko wtedy, gdy oddziałuje ona z cząstkami Modelu Standardowego. Jeżeli tak nie jest, nigdy nie zostawi ona żadnego śladu w jakimkolwiek zbudowanym przez nas detektorze. Ewentualne interakcje mogłyby obejmować oddziaływania słabe lub bozon Higgsa (w końcu, ciemna materia ma masę), a może jakiś zupełnie nowy bozon – w tej chwili nie musimy martwić się o szczegóły. Jeśli jednak takie oddziaływanie istnieje, mamy do dyspozycji trzy sposoby badania ciemnej materii, w rzeczywistości opisywane tym samym diagramem Feynmana, wobec którego zastosowano obracanie.



Obracanie diagramu Feynmana pokazuje trzy sposoby, w jakie ciemna materia może oddziaływać z cząstkami Modelu Standardowego. Szczegóły oddziaływania zostały ocenzurowane!

Na pierwszym diagramie cząstki ciemnej materii zderzają się i zamieniają w cząstki Modelu Standardowego. Droga Mleczna zawiera dużo ciemnej materii, inne galaktyki również, toteż oddziaływania tego typu zachodziłyby nieustannie. Tu na scenie pojawia się teleskop kosmiczny promieniowania gamma Fermiego. Umieszczony na orbicie w 2008 roku, okrąża naszą planetę, szukając wysokoenergetycznych fotonów powstałych w miejscach dotkniętych najgwałtowniejszymi znanymi procesami we Wszechświecie – w okolicy supermasywnych czarnych dziur, zderzających się gwiazd, pulsarów i supernowych. Poszukiwacze ciemnej materii zdali sobie sprawę z tego, że teleskop może też odbierać sygnały, których szukają, a ponieważ dane pozyskiwane przez teleskop Fermiego są dostępne w Internecie, postanowili rzucić na nie okiem. Faktycznie, znaleźli wiele promieni gamma docierających z pobliża centrum Drogi Mlecznej – rodzaj sygnałów, które mogły powstać w wyniku zderzeń cząstek ciemnej materii, sygnałów wysłanych z miejsca, gdzie znajduje się jej większość. Centrum każdej galaktyki to jednak dość zawiły obszar, z mnóstwem innych możliwych źródeł tych promieni gamma, taka obserwacja więc musi być wsparta wynikami z innych pomiarów, zanim można będzie ogłosić, że naprawdę dostrzegliśmy oddziaływania ciemnej materii.

Druga metoda, widoczna po obróceniu diagramu Feynmana, polega na tym, że dwie cząstki Modelu Standardowego zderzają się i powstaje cząstka ciemnej materii. I jeśli istnieje jakieś miejsce, gdzie zderza się dużo cząstek Modelu Standardowego, to jest to właśnie LHC: możliwe jest tworzenie ciemnej materii w CERN. Sygnał wyglądałby mniej więcej tak jak w wypadku neutrin – ciemna materia nie oddziaływałaby z detektorami, przechodziłaby przez nie, unikając wykrycia. Charakterystycznym znakiem jej obecności byłaby brakująca energia – niezbilansowane zderzenie, podczas którego po jednej stronie byłyby zrekonstruowane cząstki, a po drugiej brakująca ciemna materia. Do tej pory poszukiwanie tego rodzaju zderzeń nie przyniosło odkrycia, ale rozpoczęty drugi etap pracy LHC może wkrótce zaowocować takim wynikiem.

Nawet jeśli LHC odkryje pewne charakterystyczne zderzenia, wciąż nie będzie to rozstrzygające. Tak jak w odniesieniu do neutrin, tak

naprawdę chcemy dokonać bezpośredniego pomiaru ciemnej materii, żeby dowiedzieć się o niej więcej. Obróćmy diagram jeszcze raz. Mamy teraz cząstkę ciemnej materii odbijającą się od cząstki Modelu Standardowego – coś, co wygląda łudząco podobnie do oddziaływań neutrin z rozdziału 8. Eksperyment, w którym ciemna materia ma zostać „wykryta w sposób bezpośredni", oparty jest na bardzo podobnych podstawach jak doświadczenia z wykrywaniem neutrin – powodzenie mają zapewnić ogromnie czułe urządzenia ukryte głęboko pod ziemią w opuszczonych kopalniach, gdzie są ekranowane od promieniowania tła i promieniowania kosmicznego, których zadaniem jest wykryć garstkę oddziaływań ciemnej materii na rok. Rośnie precyzja pomiarów i na przestrzeni kilku następnych lat zostanie rozpoczętych kilka eksperymentów nowej generacji, takich jak Xenon 1T pod włoskimi Alpami i Lux-Zeplin (LZ) w kopalni w Dakocie Południowej – w tej samej, gdzie przedtem badano neutrina w eksperymencie Raya Davisa.

W idealnym układzie w eksperymencie prowadzonym w LHC, gdzie ciemna materia ma zostać wykryta w bezpośredniej obserwacji, zostanie zarejestrowany sygnał, który będzie pasował do sygnałów promieniowania gamma zaobserwowanych przez teleskop Fermiego. Jeśli tak się nie stanie, ciemna materia okaże się znacznie bardziej nieuchwytna, niż się łudziliśmy.

Większa łódka?

To naprawdę interesujące czasy. Mamy największy, najpotężniejszy eksperyment w historii, mamy też wiele innych, mniejszych doświadczeń, które wyciskają z nowoczesnych technologii ostatnie soki, a wszystko to podporządkowane jednemu celowi: polowaniu na nową fizykę. Już teraz dysponujemy pewnymi wskazówkami, że w ciągu najbliższej dekady w LHC może dojść do odkrycia całej rodziny nowych cząstek, eksperyment SuperNEMO może ujawnić naturę neutrin Majorany, a LZ – ostatecznie wykryć ciemną materię.

Spójrzmy nieco dalej w przód – w latach 2019–2020 LHC przejdzie kolejną modernizację. Tym razem nie chodzi o to, aby osiągał wyższe energie – zwiększona zostanie częstotliwość, z jaką zderzają się cząstki (czyli zwiększy się liczba zachodzących zderzeń, znana jako jasność Zderzacza). High Luminosity LHC (HL-LHC, czyli LHC wysokiej jasności) może pracować do 2035 roku i będzie wykorzystywany do szczegółowego badania wszystkich naszych fantastycznych nowych odkryć albo wymiecie nową fizykę ze wszystkich pozostałych zakamarków, w których może się ona jeszcze skrywać.

Na rok 2022 planowany jest start projektu Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), który będzie kontynuatorem tradycji detektorów badających neutrina we wspomnianej kopalni w Dakocie Południowej. Badając neutrina powstałe w akceleratorze znajdującym się w oddalonym o 1200 kilometrów Fermilabie w stanie Illinois, DUNE powinien znaleźć odpowiedź na pytania dotyczące oscylacji tych cząstek i łamania symetrii CP, przybliżając nas do zrozumienia przyczyn nieobecności antymaterii we Wszechświecie.

Zaglądanie jeszcze dalej w przyszłość staje się zabawą ze spekulacjami. Jeżeli odkryjemy w LHC pierwszą cząstkę z nowej rodziny, to następny krok będzie oczywisty: wejść w wyższe zakresy energii i znaleźć resztę. Nie będzie to jednak łatwe. Konieczne będą nowe, jeszcze potężniejsze magnesy do utrzymywania kołowego ruchu protonów w tunelu albo większy tunel. Obecnie rozważa się budowę takiego o długości 100 kilometrów, który całkowicie otaczałby Genewę i stanowił szkielet dla akceleratora osiągającego 100 TeV, co niemal ośmiokrotnie przewyższa moc LHC. Po dodaniu tej nowej warstwy do struktury instrumentów CERN Future Circular Collider (FCC), jak się go aktualnie nazywa, będzie przejmował protony wstępnie rozpędzone przez LHC, zanim nada im nowe, rekordowo duże wartości energii. Być może palmę pierwszeństwa przejmą Chiny, planowana jest tam bowiem budowa podobnej maszyny, która mogłaby zostać uruchomiona jeszcze przed FCC. Są też plany nowej maszyny do precyzyjnych pomiarów, zderzającej elektrony i pozytony, która pozwoli bardzo szczegółowo zbadać

bozon Higgsa lub jakieś jedno z nowych odkryć. Takie urządzenie mogłoby funkcjonować właśnie w nowym stukilometrowym tunelu CERN albo działać jako akcelerator liniowy gdzieś w innym miejscu na świecie.

Równie dobrze może być jednak tak, że nic nie znajdziemy. Może LHC udowodni, po raz kolejny, że Model Standardowy równie znakomicie działa w zakresie energii 13 TeV, jak sprawdzał się w niższych zakresach. Może z upływem czasu wszystkie garby ulegną wygładzeniu i znikną niezwykłe zachowania. Ciemna materia wciąż może nam się wymykać, tak samo jak sygnał podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta. DUNE może powiedzieć nam wszystko o łamaniu symetrii CP przez neutrina, ale może wcale nie wyjaśnić nieobecności antymaterii w naszym Wszechświecie. Wobec takiego scenariusza naprawdę nie jest pewne, co z tym zrobić.

FCC wciąż miałby jasny plan działania – jedyny sposób na dokonywanie odkryć to nieustannie wdzierać się na niezbadane obszary, tak jak robi to dzisiaj LHC. Jednak LHC był projektem, który musiał się udać. Gwarantował, że albo znajdzie cząstkę Higgsa, albo Model Standardowy zostanie obalony. Ponieważ cząstka Higgsa została odkryta, wiemy, że musi być tam więcej cząstek do odkrycia, ale mamy do dyspozycji bardzo mało wskazówek, gdzie ich szukać. Jeżeli poszukiwania w nadchodzących latach okażą się bezskuteczne, to nie będzie gwarancji, że cokolwiek uda się znaleźć nawet w energiach rzędu 100 TeV. W 1993 roku Senat Stanów Zjednoczonych odebrał finansowanie projektowi Superconducting Super-Collider, wielkiej maszynie, którą zaczęto budować na południe od Dallas w Teksasie. Gdyby powstała, zderzałaby protony w energii 40 TeV, dużo wyższej niż LHC, i pozwoliłaby odkryć bozon Higgsa wiele lat wcześniej. Uznano jednak, że projekt jest zbyt kosztowny. Plany budowy jeszcze większego Zderzacza w CERN może spotkać ten sam los, jeśli nie będzie żadnych wskazówek świadczących o możliwości dokonania odkryć. Przyszłość fizyki cząstek może się wiązać z powrotem do deski kreślarskiej. Zamiast kolejnego wielkiego eksperymentu w rodzaju LHC przyszłość może przynieść zróżnicowanie: dużo mniejszych, nowych eksperymentów i nowych

pomysłów, nastawionych na sprawdzenie każdego odległego zakątka Modelu Standardowego.

Tak wygląda etap, na którym teraz się znajdujemy – na krawędzi rewolucji lub na początku długiego okresu cierpliwego wyczekiwania. To pora na nowatorskie i różnorodne eksperymenty i analizy danych, czas na zarzucanie sieci możliwie najszerzej, czas na upewnienie się, że zadajemy właściwe pytania, które poprowadzą nas do nowego wielkiego odkrycia.

Sens tego wszystkiego

XX wiek przyniósł rewolucję w fizyce, która doprowadziła do powstania rewolucyjnych technologii i odmieniła nasze życie. Mechanika kwantowa była całkowitym zaskoczeniem, jak wszystkie egzotyczne cząstki, które potem odkryto. Trzeba było wielu dziesięcioleci, aby wszystko to zrozumieć. Powstała teoria, Model Standardowy, ma wielką wagę zarówno w aspekcie nauki, jak i kultury – nigdy wcześniej w naszej historii nie osiągnęliśmy tak szczegółowego zrozumienia Wszechświata.

Moja książka dotyczy właśnie tego zrozumienia – stojących za nim eksperymentów i teorii, ukrytego piękna Wszechświata, które powoli zaczynamy odsłaniać. Nie było moim zamiarem opowiadanie o produktach ubocznych tej naukowej przygody – choć było ich wiele i o kilku na kartach książki wspomniałem. Nie chciałem też pisać o tym, w jaki sposób coś takiego jak bozon Higgsa może być użyteczne, zwyczajnie dlatego, że tak naprawdę nie mam pojęcia. Jest chyba niemożliwe, aby sobie wyobrazić, dokąd zaprowadzą nas nowe odkrycia – na przykład nikt nie był w stanie przewidzieć, iż mechanika kwantowa doprowadzi do półprzewodników i rewolucji cyfrowej. W 1943 roku prezes IBM myślał: „Na całym świecie znajdzie się może pięciu zainteresowanych nabyciem komputera”. Mam jednak pewność, że nie będzie czego wykorzystać, jeśli nie dokonamy tych odkryć. Nie mam też wątpliwości, że te, których już dokonaliśmy, znajdą jakieś praktyczne zastosowanie w przyszłości.

Teraz może mi się wydawać, że nie ma na świecie klientów zainteresowanych bozonem Higgsa, ale mam nadzieję, że kiedyś ludzie spojrzą z politowaniem na te naiwne słowa, gdy będą beztrosko sobie latać w napędzanych bozonem Higgsa statkach kosmicznych.

Jest jeszcze do opowiedzenia zupełnie odrębna historia o ludziach, którzy, jak ja, poświęcili życie badaniu świata nieskończenie drobnych ciał. Jest nas wielu i każdy mógłby podzielić się własną opowieścią. Każdy z nas znalazł swoją inspirację i każdy z nas z własnych powodów uznał, że warto się tym zająć. Tak więc powiem tylko, jakie jest moje zdanie. Myślę, że świat jest lepszym miejscem, gdy wiemy, że bozon Higgsa istnieje. Jeśli są jakieś dodatkowe wymiary, świat będzie lepszy, gdy będziemy o tym wiedzieć. Lepszy w ten sam sposób, jak lepszy stał się za sprawą istnienia *Mony Lisy*, Tadż Mahal, egipskich piramid, Machu Picchu, *Hamleta*, ogólnej teorii względności, muzyki, tańca, Internetu lub czegokolwiek innego, co wzbogaca nasze życie, czyni je piękniejszym i pełniejszym. Nie wyobrażam sobie, że mógłbym chcieć robić coś innego niż pomagać w napisaniu kolejnego rozdziału tej opowieści. A następny rozdział może zaczynać się właśnie teraz...

ROZDZIAŁ 12

NOWA FIZYKA

W 2015 roku w LHC po raz pierwszy na świecie przeprowadzono zderzenia z energią 13 TeV. Było trochę trudniej, niż się spodziewano, ale nikt nigdy nie zakładał, że łatwe będzie przywrócenie tej fantastycznie skomplikowanej maszyny do pełnej sprawności, po dwóch latach napraw i udoskonaleń, po czym wyciśnięcie z niej wszystkiego, co się da, żeby zapewnić zderzenia z energią niemal dwukrotnie przewyższającą poprzednią rekordową wartość. Jednak od czerwca do listopada trwało w nim rozbijanie protonów i rejestrowanie wyników.

Było też mnóstwo pracy dla eksperymentatorów: aktualizowanie kalibracji, badanie, jak w tych nowych wysokich energiach zachowują się detektor i same zderzenia. Oraz, oczywiście, analiza tych zderzeń w poszukiwaniu oznak czegoś nowego. W celu uniknięcia wzajemnego wpływania na siebie nawzajem eksperymenty ATLAS i CMS pracowały niezależnie dopóty, dopóki wyniki nie były absolutnie pewne i gotowe do upublicznienia. Wreszcie 15 grudnia 2015 roku obydwa zespoły mogły porównać swoje osiągnięcia.

W celu zapewnienia niezależności eksperymenty musiały do pewnego stopnia pozostawać tajne. Dopóki wyniki nie były gotowe do upublicznienia, wszelkie dane i bieżące analizy trzymano za zamkniętymi drzwiami. Jednak wobec zaangażowania w projekty ponad sześciu tysięcy osób plotki były nieuniknione. I tak w okresie poprzedzającym 15 grudnia pojawiły się pogłoski, że ATLAS znalazł coś nieoczekiwanego.

Każde odkrycie na tym etapie jest doniosłe. Model Standardowy nie przewiduje więcej cząstek, toteż gdyby jakieś się pojawiły, byłoby to znamienne wydarzenie – nowina, na którą ludzie czekali od lat, a nawet od dziesięcioleci. Tak więc niektórzy teoretycy stali się nieco przesadnie podekscytowani. Mówimy na to *ambulance chasing*[2]: wystarczy drobna wzmianka o czymś nowym, nieważne, jak mała i nieistotna, a już niektórzy ludzie rzucają się na nią jak na niezbity dowód swojej ulubionej teorii. A słysząc te pogłoski, wielu gotowych było się rzucić.

Pracuję w zespole eksperymentu ATLAS, wobec czego śledziłem niektóre z wewnętrznych dyskusji, jakie toczyły się przed podaniem wyników do wiadomości publicznej. Pojawił się garb. Nie jakiś ogromny, niemniej jednak garb. Nagromadzenie zdarzeń z udziałem dwóch fotonów – tego samego rodzaju, którymi posłużyliśmy się, odkrywając garb sygnalizujący bozon Higgsa, co opisałem w rozdziale 7. Tylko że ten był znacznie cięższy: bozon Higgsa miał masę 125 GeV, nowy garb powstał w energii 750 GeV. Tego rodzaju zjawiska wzbudzają tyle samo podniecenia co sceptycyzmu. Zapewne było to po prostu losowe nagromadzenie zdarzeń w tle. Ewentualnie jakiś szum w detektorze. Mimo wielokrotnego sprawdzania wyników doświadczenia garb nie zniknął. Zatem 15 grudnia nadszedł czas publikacji i przeprowadzenia ostatecznej weryfikacji: czy CMS zobaczył to samo?

Seminaria odbywały się w głównym audytorium CERN, tym samym, w którym w 2012 roku ogłoszono odkrycie bozonu Higgsa. Tym razem wystąpienia zaplanowano na popołudnie, nie trzeba więc było koczować całą noc, ale hol zaczął się zapełniać już kilka godzin przed czasem. Wreszcie po przedstawieniu wielu imponujących wyników nowych pomiarów, jakie przeprowadzono dzięki zebranym danym, nadszedł czas na histogram, który wszyscy chcieli zobaczyć: weź zdarzenia z dwoma fotonami i połącz fotony, by obliczyć masę. I obydwa, ATLAS oraz CMS, odnotowały garb. W tym samym miejscu: dwa fotony sumujące się do 750 GeV.

Co zrozumiałe, oficjalny komunikat CERN był ostrożnie sformułowany: stwierdzał, że oba eksperymenty „zaobserwowały

nieznaczną nadwyżkę w kanale rozpadu dwufotonowego". Przy czym same wyniki nie były na tyle duże, żeby wzbudzać przesadną ekscytację. Garb CMS to 2,6σ ponad tło, a ten z eksperymentu ATLAS 3,6σ. W rozdziale 7 znajduje się wyjaśnienie, czym jest σ, tu przypomnę tylko, że jest to miara niepewności określająca, jakie są szanse na to, iż przypadkowe nałożenie się zdarzeń tła wyprodukuje fałszywy garb. Im wyższa liczba, tym mniej prawdopodobne, że tak się stanie. Normalnie, zanim ogłosimy, że garb musi być oznaką istnienia nowej cząstki, wymagamy wartości 5σ ponad oczekiwany poziom tła. Fakt, że ATLAS i CMS odnotowały go w tym samym miejscu, z pewnością czyni go bardziej ekscytującym – jednak na razie trudno o definitywne rozstrzygnięcie. Zanim stwierdzimy, czy garb jest prawdziwy, czy nie, potrzebujemy więcej danych.

Co prawda są tacy, którym to wystarczyło. Już w kilka minut po ogłoszeniu wyników zaczęły pojawiać się artykuły z teoriami – tak szybko, że pierwsze z nich musiały powstać jeszcze przed komunikatem, na podstawie samych pogłosek. Osiem pierwszego dnia, 65 po tygodniu, 121 do końca 2015 roku. Kiedy LHC ruszył po przerwie zimowej, na początku 2016 roku, było ich już ponad 300. Z pewnością nie czytałem wszystkich, ale wątpię, by na temat tego garbu faktycznie dało się powiedzieć ponad 300 ciekawych rzeczy. Ten zalew artykułów spowodowany jest zapewne kombinacją przesadnej ekscytacji, wyścigu po pierwszeństwo oraz presji instytucji zapewniających fundusze, które wymagają ciągłej produkcji artykułów.

By oddać im sprawiedliwość, trzeba przyznać, że jeśli rzeczywiście jest to nowa cząstka, to mamy do czynienia z bardzo ekscytującym odkryciem. Tym bardziej że zgoła nieoczekiwanym – pośród wszystkich możliwych scenariuszy niewielu badaczy postawiłoby na nowy sygnał dwufotonowy. Można go też różnorako zinterpretować. Może to być cząstka związana z dodatkowymi wymiarami, a równie dobrze – całkowicie nowy bozon, stowarzyszony z wcześniej nieznaną siłą natury. I, oczywiście, może to być jedna z cząstek przewidywanych przez supersymetrię, ponieważ ta teoria potrafi przewidzieć niemal wszystko. Wreszcie może to być drugi, cięższy bozon Higgsa – co byłoby całkowitą niespodzianką.

Obydwa zespoły były zajęte również podczas przerwy zimowej, przeprowadzając bardziej gruntowne analizy danych z 2015 roku z użyciem najnowszych kalibracji i technik analitycznych. I garby stały się nieco większe: 3,4s dla CMS oraz 3,9s dla eksperymentu ATLAS. Choć wciąż nie są to wartości rozstrzygające, to zdecydowanie idą we właściwym kierunku. Nadal jednak istnieje realna możliwość, że nic tam nie ma. Żadnego rewolucyjnego odkrycia nowej cząstki, jedynie bardzo sugestywny, przypadkowy zlepek zdarzeń tła. Tego rodzaju garby pojawiały się i znikały już wcześniej. Jedynym sposobem na to, żeby się upewnić, czy to prawda, jest zebranie więcej danych, do czego LHC zabierał się w maju 2016 roku, lecz znowu znalazł się w nagłówkach gazet całego świata. Tym razem winien był inny garb: łasica (właściwie kuna domowa) znalazła drogę do jednej z naziemnych stacji elektrycznych i przegryzła kabel, powodując zwarcie, które wymagało kilkudniowej naprawy. Natura zadziwia nas na wiele sposobów!

Kiedy piszę te słowa, sezon 2016 w LHC trwa. Gdy Zderzacz zakończy swoją pracę, a dane zostaną poddane analizie, będziemy mieli pewność, czy znaleziony garb jest prawdziwy, czy też nie. To najbardziej ekscytujący rok w fizyce cząstek od bardzo długiego czasu i jeśli okaże się, że ta nowa cząstka istnieje, jej odkrycie będzie nawet istotniejsze od zaobserwowania bozonu Higgsa[3]. Byłby to pierwszy namacalny obraz tego, co znajduje się poza Modelem Standardowym. Wreszcie Nowa Fizyka.

2 Dosł. „gonienie za karetką”, używane w odniesieniu do reporterów, prawników itp. osób szukających profitów w kontaktach np. z ofiarami wypadków (przyp. tłum.).

3 Niestety, jak ogłoszono na konferencji ICHEP w sierpniu 2016 roku w Chicago, wyniki się nie potwierdziły. To, co zarejestrowano, okazało się zwykłą fluktuacją statystyczną (przyp. tłum.).

DODATEK 1

WYJAŚNIENIE ZAPISU LICZB

Fizyka cząstek zawiera absurdalnie dużo absurdalnie małych obiektów. Mówienie o nich staje się skomplikowane – choćby dlatego, że wciąż musielibyście używać zwrotów typu „milionowa część miliardowej części miliardowej części" czegoś tam. Mamy zatem skrótowy system zapisu takich liczb, po części znany wam zapewne z jednostek pamięci komputera: megabajty, gigabajty i tak dalej. Każdy przedrostek (mega-, giga-) może zostać skrócony do jednej litery (M, G) i reprezentować dodatkowy czynnik 1000. I tak megabajt to jeden milion bajtów, a gigabajt – miliard bajtów.

Powyższe liczby można również zapisać jako potęgi dziesięciu. Dziesięć do kwadratu, czyli $10 \times 10 = 10^2 = 100$. Sześcian dziesięciu, czyli $10 \times 10 \times 10 = 10^3 = 1000$. $10^6 = 1\ 000\ 000$, i tak dalej – „wykładnik potęgi" wskazywany przez indeks górny to liczba zer liczby w pełnym zapisie. Dzieląc przez bardzo duże liczby, możemy otrzymać również bardzo małe, które zapisujemy, stawiając przed wykładnikiem znak minus. Na przykład

$1 \div 100 = 10^{-2} = 0{,}01$, a $1 \div 1000 = 10^{-3} = 0{,}001$, i tak dalej.

Oto lista skrótów używanych w tej książce:

liczba	**nazwa**	**potęga 10**	**przedrostek**	**symbol**
		10^{15}	peta	P
	bilion	10^{12}	tera	T
1 000 000 000	miliard	10^{9}	giga	G

1 000 000	milion	10^6	mega	M
1 000	tysiąc	10^3	kilo	k
0,001	jedna tysięczna	10^{-3}	mili	m
0,000 001	jedna milionowa	10^{-6}	mikro	μ
0,000 000 001	jedna miliardowa	10^{-9}	nano	n
	jedna bilionowa	10^{-12}	piko	p
		10^{-15}	femto	f

DODATEK 2

SYMETRIE MODELU STANDARDOWEGO

Rozdział 6 rozwijał niektóre wykorzystywane w fizyce cząstek idee symetrii. Ten krótki dodatek zawiera trochę dodatkowych informacji na temat konstrukcji Modelu Standardowego oraz stosowanych nieraz w jego opisie symboli U(1) × SU(2) × SU(3). Znajdziecie tu nieco więcej matematyki niż w pozostałych częściach książki, ale w końcu to właśnie matematyka jest naszym przewodnikiem po świecie subatomowym. A podczas budowania Modelu Standardowego to właśnie ona ujawniła problem.

Przede wszystkim cofnijmy się do samej idei symetrii jako przekształcenia, które nie zmienia sposobu, w jaki zachowuje się Wszechświat. Niektóre z tych symetrii wydają się wręcz trywialne. Bieżnia o długości 100 metrów ma długość 100 metrów, mimo że Ziemia wykonuje ruch obrotowy – i zabiera całą bieżnię z sobą. Mówiąc językiem symetrii, powiemy, że bieżnia jest symetryczna (niezmienna) względem przekształcenia (obrotu Ziemi). Możliwe jest stworzenie całej „grupy” przekształceń dla tej symetrii: ruch wirowy Ziemi, ruch orbitalny Ziemi wokół Słońca, ruch obrotowy Słońca wraz z ramieniem spiralnym galaktyki Drogi Mlecznej i tak dalej. Ten rodzaj symetrii czyni wyścig znacznie prostszym: wystarczy tylko biec od startu do mety, bez sprawdzania swojej orientacji względem Słońca czy reszty Wszechświata. Kiedy nie ma symetrii, wszystko staje się bardziej skomplikowane. Planując misję Apollo na Księżyc, trzeba było wziąć pod uwagę orientację Ziemi względem Księżyca oraz jej zmiany podczas lotu rakiety.

Matematycy badali symetrie, jeszcze zanim znalazły one swoje zastosowanie w fizyce. Dziewiętnastowieczny matematyk norweski

Sophus Lie (wymawiany „Li”) interesował się własnościami grup przekształceń, a jego prace doprowadziły do powstania teorii Emmy Noether i wielu innych. Tak więc kiedy zastosowano symetrie do fizyki cząstek, istniały już gotowe narzędzia do ich zrozumienia, znane jako algebra Liego.

Model Standardowy zbudowany jest na symetrii cechowania, powiązanej z wielkościami, których nie możemy poddać bezpośrednim pomiarom, takimi jak określanie wartości „krokomierza” cząstek czy kierunku „wiatrowskazu” ładunku kolorowego kwarków. Skoro nie możemy zmierzyć tych zjawisk bezpośrednio, ich dokładne ustawienia nie mogą zmienić tego, jak zachowuje się Wszechświat – a to oznacza, że musi tu być jakaś symetria. Musi istnieć sposób na zmianę wartości „krokomierza” cząstek bez zmiany wyniku eksperymentu. Gdyby eksperymenty były wrażliwe na te ustawienia, bylibyśmy w stanie je zmierzyć. W istocie to nie bezwzględne ustawienia krokomierzy się liczą, ale ich względne ustawienia dla dwóch cząstek. Jeżeli zachodzą w nich jakieś zmiany, musi istnieć sposób, dzięki któremu cząstki komunikują się z sobą i sprawdzają wzajemną synchronizację.

Przekładając to na język algebry Liego, powiemy, że wewnętrzny krokomierz cząstki to własność „jednowymiarowa”, jak zegar z jedną wskazówką, i można go nakręcać tylko do przodu lub do tyłu (a nie na przykład „w lewo” czy „do góry”). Co oznacza, że w gruncie rzeczy możliwa jest tylko jedna transformacja: kręcenie wskazówką dookoła. Przekształcenie to tworzy tak zwaną grupę U(1). U oznacza unitarna, czyli że długość wskazówki krokomierza pozostaje stała, zmienia się jedynie wskazywany przez nią kierunek. Z kolei 1 wskazuje, że chodzi o wielkość jednowymiarową. W każdej grupie unitarnej liczba stowarzyszonych z nią zmian dana jest wzorem n^2, gdzie n to liczba wymiarów. Stąd niniejsza grupa zawiera jedną zmianę: nakręcanie zegara.

Teraz to, co zdumiewające: matematyka mówi nam, że istnieje jedno możliwe przekształcenie dla krokomierza cząstki, a to jedno możliwe przekształcenie odpowiada jednej realnej cząstce fizycznej. Ta cząstka to bozon cechowania dla tej symetrii i w taki właśnie

sposób cząstki komunikują się z sobą i sprawdzają swoją względną synchronizację. Początkowo sądzono, że ta cząstka to foton, jednak w Modelu Standardowym jest nią bozon B, który później miesza się z bozonem W^0, produkując foton (i bozon Z).

W oddziaływaniu silnym możliwe są trzy wymiary (czerwony, zielony i niebieski) oraz więcej zmian: obrót z czerwonego na zielony, z niebieskiego na czerwony i tak dalej. Zebranie wszystkich możliwych obrotów wiatrowskazu ładunków kolorowych daje nam grupę SU(3). U ponownie oznacza grupę unitarną, czyli że zmianie nie ulega długość wiatrowskazu, ale jedynie wskazywany przez niego kierunek. Liczba 3, ponieważ mamy do czynienia z wielkością trójwymiarową. S oznacza grupę specjalną, która nie zawiera niczego, co stanowiłoby ekwiwalent zwykłego nakręcania w grupie U(1). Usuwając to, otrzymujemy $(n^2 - 1)$ możliwych transformacji w grupach specjalnych.

I znowu matematyka odpowiada realnie istniejącym obiektom fizycznym. W grupie SU(3) jest osiem możliwych transformacji, które odpowiadają ośmiu różnym rodzajom gluonów, przenoszącym różne kombinacje kolorów (niebieski + antyczerwony, czerwony + antyzielony i tak dalej).

Wreszcie słaby ładunek to dwa ustawienia, orzeł lub reszka, możliwe przekształcenia tworzą więc grupę SU(2). Algebra Liego, matematyka symetrii, znów mówi nam, że powinno być $(n^2 - 1)$ możliwych transformacji, co oznacza, iż mają być trzy bozony W: W^+, W^0 i W^-. I to było wskazówką, że czegoś brakuje. Chociaż bozony W^+ i W^- zaobserwowano w naturze, to bozonu W^0 nie zarejestrowano. W celu wyjaśnienia tego fenomenu potrzebny był model elektrosłaby, który wykorzystuje mechanizm Higgsa do zmieszania bozonu W^0 z bozonem B – produkując foton i bozon Z – zarazem nadając cząstkom masę.

Tak więc oddziaływania Modelu Standardowego często zapisywane są w nomenklaturze algebry Liego jako U(1) × SU(2) × SU(3). Pierwsza część, U(1) × SU(2), to model elektrosłaby, łączący symetrię jedno- i dwuwymiarową. Wówczas SU(3) reprezentuje

trójwymiarową symetrię chromodynamiki kwantowej, oddziaływanie silne. Każdej symetrii odpowiada grupa przekształceń, a każde z tych przekształceń odpowiada realnej cząstce, bozonowi cechowania, który przenosi oddziaływania. Gluony przekształcają stan koloru kwarka, bozony W przekształcają „orły” w „reszki” (jak elektron w neutrino), a bozon B nakręca krokomierz cząstki. To nie tylko matematyka, to realne zdarzenia. Za oddziaływaniami w Modelu Standardowym, siłami, które kształtują świat wokół nas, w rzeczywistości stoją symetrie cechowania, które wydają się fundamentalnymi cechami Wszechświata, wszystkie zapisane językiem matematyki. Piękne, doprawdy.

SŁOWNICZEK

atom – podstawowa cegiełka wszelkiej materii. Atomy składają się z chmury elektronów orbitujących wokół maleńkiego, centralnie położonego jądra zbudowanego z protonów i neutronów. W normalnym atomie na każdy proton przypada jeden elektron. Liczba neutronów może być różna, a niektóre konfiguracje są niestabilne (promieniotwórcze).

barion – cząstka złożona, zbudowana z trzech kwarków związanych za pomocą gluonów (lub, w wypadku antybarionu, trzech antykwarków).

bozon – typ cząstki elementarnej, „nośnik oddziaływań". Fotony, gluony, W, Z i cząstka Higgsa – wszystko to są bozony. Nazwane na cześć hinduskiego fizyka Satyendry Natha Bosego bozony wirują w tempie równym jednostce całkowitej: bozon Higgsa ma spin równy 0, a spin pozostałych wynosi 1. Przewidywany teoretycznie (jak dotąd nieodkryty) grawiton miałby spin równy 2. Co charakterystyczne dla bozonów, to fakt, że w przeciwieństwie do fermionów mogą one nakładać się na siebie, zajmując tę samą przestrzeń w tym samym czasie.

bozon Higgsa – ostatni element Modelu Standardowego, odkryty w 2012 roku w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Bozon Higgsa jest cząstką stowarzyszoną z polem Higgsa, wypełniającym cały Wszechświat „zbiornikiem" energii. Stanowi coś w rodzaju „zmarszczki" na tym polu. Inne cząstki mogą oddziaływać z polem Higgsa, czy też „przylgnąć" do niego, unosząc część jego energii jako masę. Sam bozon Higgsa może oddziaływać z dowolną cząstką, która przylgnęła do pola Higgsa – to jest z dowolną cząstką obdarzoną masą.

chromodynamika kwantowa, QCD – teoria cechowania oddziaływania silnego stowarzyszona z bozonem cechowania, gluonem. Oddziaływanie silne utrzymuje kwarki w hadronach oraz protony i neutrony w jądrach atomów. Doświadczają go wszystkie cząstki, które przenoszą ładunek kolorowy (mianowicie zarówno kwarki, jak i gluony).

cząstka – najmniejszy kawałek materii, przy czym w fizyce cząstek są ich dwa rodzaje: cząstki złożone i elementarne. Cząstki złożone, ogólnie rzecz biorąc, zachowują się jak obiekty jednolite, lecz w rzeczywistości zbudowane są z mniejszych części. Cząstkami złożonymi są protony i wszystkie hadrony, gdyż składają się z kwarków utrzymywanych razem przez gluony. Uderz proton wystarczająco mocno, a pęknie. O ile możemy to stwierdzić, cząstki elementarne nie są zbudowane z niczego mniejszego (aczkolwiek może to tylko znaczyć, że jak dotąd nie poddaliśmy ich wystarczająco silnym zderzeniom). Obecnie jedyne odkryte przez nas cząstki elementarne to dwanaście fermionów i pięć bozonów Modelu Standardowego.

cząstka elementarna – cząstka, która nie jest zbudowana z mniejszych cząstek, a przynajmniej nic o tym nie wiemy. Elektrony są elementarne, ale protony nie. Protony zbudowane są z kwarków. Model Standardowy to teoria dotycząca dwunastu fermionów elementarnych i pięciu bozonów elementarnych.

cząstka wirtualna – cząstka uwięziona wewnątrz diagramu Feynmana. Niemożliwe jest poddanie jej bezpośrednim pomiarom. Wolno jej wykorzystywać zasadę nieoznaczoności do naginania praw fizyki: pożyczania energii na krótki okres.

diagram Feynmana – rysunek, który symbolicznie przedstawia leżącą u podstaw fizyki cząstek matematykę. Można go wykorzystać do obliczenia prawdopodobieństwa danego oddziaływania oraz wszystkich możliwych wyników. Każdy diagram Feynmana przedstawia jedno z wielu możliwych zjawisk, jakie mogą się zdarzyć podczas oddziaływania cząstek.

elektrodynamika kwantowa, QED – teoria kwantowa oddziaływania elektrodynamicznego. Oddziaływanie to stowarzyszone jest z bozonem cechowania, fotonem, a podlegają mu wszystkie cząstki, które przenoszą ładunek elektryczny.

elektromagnetyzm – jedno z oddziaływań Modelu Standardowego. Eksperymenty przeprowadzone w XIX i XX wieku wykazały, że pozornie różne zjawiska elektryczności statycznej i magnetyzmu w rzeczywistości są efektem działania tej samej siły, elektromagnetyzmu. W Modelu Standardowym oddziaływanie elektromagnetyczne przenoszone jest przez fotony, które fruwają między cząstkami przenoszącymi ładunek elektryczny. Przeciwne ładunki (dodatni i ujemny) przyciągają się, podczas gdy takie same ładunki się odpychają.

elektron – jedna z cząstek elementarnych Modelu Standardowego. Odkryty w 1897 roku, przenosi jedną jednostkę ujemnego ładunku elektrycznego i można go znaleźć we wszystkich atomach. Oddziaływanie między elektronami sąsiednich atomów decyduje o tym, jak oddziałują z sobą różne pierwiastki chemiczne. Prąd elektryczny to po prostu ruch elektronów.

elektronowolt (eV) – standardowa jednostka energii, pędu i masy używana w fizyce cząstek. 1 eV to energia, jaką zyskuje elektron przyspieszany w polu elektrycznym o różnicy potencjałów równej 1 wolt. Stosując wzór $E = mc^2$ oraz „jednostki naturalne", w których prędkość światła zdefiniowana jest jako 1, można przełożyć energię na masę. Masa neutrina to mniej niż 1 eV, elektronu 511 keV (511 000 eV), protonu 938 MeV (938 000 000 eV), bozonu Higgsa 125 GeV (125 000 000 000 eV), a najcięższej cząstki, kwarka wysokiego, 173 GeV. LHC zderza obecnie protony z energią 13 TeV (13 000 000 000 000 eV).

fermion – typ cząstki elementarnej; fermiony są „cząstkami materii". Wszystkie kwarki i leptony są fermionami. Fermiony zostały nazwane na cześć włosko-amerykańskiego fizyka Enrica Fermiego i spełniają równanie Diraca. Charakteryzuje je spin połówkowy (wszystkie fermiony elementarne mają spin równy

1/2). Dwa identyczne fermiony nie mogą zajmować tej samej pozycji (mówiąc technicznie, tego samego stanu kwantowego, czyli nie mogą mieć takiego samego zestawu liczb kwantowych). I tak elektrony w atomie nie siedzą po prostu na orbicie najbliższej jądra, ale sukcesywnie zapełniają wyższe orbity. Właściwie są dwa rodzaje fermionów: wszystkie fermiony Modelu Standardowego są fermionami Diraca, chociaż neutrina mogą być fermionami Majorany, co oznaczałoby, że są własnymi antycząstkami.

foton – cząstka światła. Jest bozonem, „cząstką pośredniczącą" oddziaływania elektromagnetycznego. Foton przenosi między naładowanymi cząstkami energię i pęd, popychając je ku sobie lub odpychając od siebie nawzajem.

gluon – jest bozonem, „cząstką pośredniczącą" oddziaływania silnego. Przenosząc między cząstkami ładunek „kolorowy" oddziaływania silnego, przekazuje między nimi energię i pęd.

grawitacja – siła, z którą jesteśmy najlepiej zaznajomieni, ale której nie wpasowaliśmy jeszcze w Model Standardowy. Przyciąganie grawitacyjne trzyma nas tutaj, na powierzchni Ziemi, oraz więzi Ziemię na orbicie wokół Słońca. Najnowszą teorią grawitacji jest ogólna teoria względności Einsteina, która opisuje tę siłę jako zakrzywienie przestrzeni i czasu. Obecnie nie istnieje kwantowa teoria grawitacji, a jej opracowanie od dziesięcioleci stanowi jeden z celów fizyki teoretycznej.

hadron – dowolna cząstka zbudowana z kwarków. Istnieją dwa podstawowe rodzaje hadronów – bariony (trzy kwarki) i mezony (kwark i antykwark) – choć mogą też istnieć bardziej egzotyczne i skrajnie niestabilne hadrony, takie jak tetrakwarki (dwa kwarki i dwa antykwarki) czy pentakwarki (cztery kwarki i antykwark). Znanych jest ponad sto różnych hadronów, które mogą stanowić kombinację dowolnych kwarków z wyjątkiem kwarka wysokiego, tak niestabilnego, że uległby rozpadowi, zanim udałoby się go związać.

kwantowa teoria pola – wersja mechaniki kwantowej zastosowana w Modelu Standardowym. Kwantowa teoria pola została zbudowana na podstawie równania Diraca, szczególnej teorii względności i symetrii cechowania.

kwark – typ fermionu elementarnego, który jest podatny na oddziaływanie silne (podobnie jak na oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne). Jest sześć kwarków: górny, dolny, dziwny, powabny, niski i wysoki.

lepton – nazwa pochodzenia greckiego, od słowa lekki. Leptony są fermionami elementarnymi, które nie reagują na oddziaływania silne. Elektrony, miony, taony i neutrina są leptonami.

mechanika kwantowa – opisuje zachowanie świata w najmniejszej ze znanych nam skal. Sama idea jest prosta: obiekty występują w „porcjach", czyli „kwantach". Dotyczy to materii, którą można rozbić na atomy, a dalej na cząstki elementarne Modelu Standardowego, ale również energii i pędu, które są przekazywane między cząstkami w przenoszonych przez bozony „porcjach". Pełne zrozumienie płynących z tych idei implikacji wymaga stworzenia sobie obrazu cząstek i ich przeróżnych dziwacznych zachowań, które zostały opisane w rozdziale 2.

mezon – hadron zbudowany z kwarka i antykwarka, związanych z sobą za pomocą gluonów.

model elektrosłaby – opracowany w 1968 roku model elektrosłaby stanowi jądro Modelu Standardowego. Według tej teorii oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są z sobą związane mechanizmem Higgsa, dając masę bozonom W i Z, lecz pozostawiając bezmasowe fotony.

Model Standardowy – obecnie najlepsza teoria Wszechświata w najmniejszej skali. Model Standardowy zawiera dwanaście cząstek materii (fermionów), które wchodzą z sobą w interakcje za pośrednictwem trzech różnych oddziaływań (elektromagnetycznego, silnego i słabego). Cząstki zyskują masę

przez oddziaływanie z polem Higgsa, z którym stowarzyszona jest kolejna cząstka, bozon Higgsa.

neutrino – najbardziej tajemnicza cząstka Modelu Standardowego, przewidziana po raz pierwszy w 1930 roku przez Wolfganga Pauliego, lecz odkryta dopiero w 1956 roku. Istnieją trzy „zapachy" neutrin (neutrino elektronowe, mionowe i taonowe), które mają niezmiernie małą masę, ponad milion razy mniejszą niż następna pod względem masy cząstka, elektron. Reagują one tylko na oddziaływanie słabe, wobec czego bardzo rzadko wchodzą w interakcje. Nie wiadomo jeszcze, czy neutrino i antyneutrino to w rzeczywistości jedna i ta sama cząstka (co czyniłoby ją fermionem Majorany, zob. rozdział 8).

neutron – jeden ze składników jądra atomowego; neutron jest barionem, czyli hadronem złożonym z trzech kwarków (górnego, dolnego i dolnego). Nie ma ładunku elektrycznego.

oddziaływanie silne – oddziaływanie, które utrzymuje jądro atomu w całości oraz więzi kwarki wewnątrz hadronów. W Modelu Standardowym oddziaływanie silne opisywane jest przez QCD oraz przenoszone przez gluony, bozony cechowania.

oddziaływanie słabe – prawdopodobnie najbardziej tajemnicze oddziaływanie w Modelu Standardowym. Przenoszone jest przez dwa bozony, bozon W oraz bozon Z. Inaczej niż wszystkie inne znane nam bozony cechowania, bozony W i Z mają masę. Naładowane elektrycznie bozony W mogą zmienić rodzaj cząstki, z którą oddziałują (na przykład elektron w neutrino, kwark górny w kwark dolny). Bozon Z został przewidziany przez model elektrosłaby i zachowuje się całkiem jak ciężki foton.

promieniowanie kosmiczne – wysokoenergetyczne cząstki (głównie protony) produkowane w jednych z najbardziej dramatycznych zdarzeń we Wszechświecie: wybuchach gwiazd (supernowych), kwazarach i aktywnych jądrach galaktyk. Kiedy cząstki promieniowania kosmicznego bombardują atmosferę ziemską, powodują powstanie kaskady cząstek, z których część (głównie miony i neutrina) żyje wystarczająco długo, by dotrzeć

do powierzchni Ziemi. Zderzenia te mogą zachodzić z energią tysiące razy większą niż osiągana w Wielkim Zderzaczu Hadronów.

proton – jeden ze składników jądra atomowego. Proton jest barionem, czyli hadronem zbudowanym z trzech kwarków (górnego, górnego, dolnego). Proton przenosi jedną jednostkę dodatniego ładunku elektrycznego.

QCD zob. chromodynamika kwantowa.

QED zob. elektrodynamika kwantowa.

relatywistyka – stworzona przez Einsteina teoria czasu i przestrzeni, która występuje w dwóch wersjach: szczególnej i ogólnej teorii względności. Szczególna teoria względności, opublikowana w 1905 roku, opiera się na pomyśle, że nic nie może poruszać się z prędkością większą niż prędkość światła (c), i prowadzi do słynnej zależności między energią (E) a masą (m): $E = mc^2$. Szczególna teoria względności jest słuszna dla ruchu ze stałą prędkością, natomiast ogólna teoria względności rozszerza tę ideę o ruch przyspieszony – a czyniąc to, opisuje grawitację jako zakrzywienie przestrzeni i czasu.

równanie Diraca – odkryte przez Paula Diraca w 1928 roku, opisuje zachowanie wszystkich fermionów i jest podstawą naszego rozumienia, jak zachowują się cząstki. Oto jego najprostsza postać: ig.dy = my.

skala Plancka – skala energii i masy, w której mechanika kwantowa i grawitacja stają się jednakowo ważne. Skala Plancka to około 10^{16} TeV, czyli milion miliardów razy więcej niż energia osiągana w Wielkim Zderzaczu Hadronów.

supersymetria (SuSy) – jedno z najpowszechniejszych rozszerzeń Modelu Standardowego, które przewiduje, że każda cząstka tego modelu ma swojego „superpartnera”. Fermiony mają bozonowego „superpartnera”, a bozony fermionowego. SuSy mogłaby rozwiązać wiele problemów Modelu Standardowego, jednak obecnie nie mamy dowodów na jej istnienie.

symetria cechowania – jedna z najtrudniejszych, ale też najpotężniejszych koncepcji fizyki cząstek. Symetria cechowania odnosi się do arbitralnego określenia stosowanego wewnątrz Modelu Standardowego. Wracając do przykładu z rozdziału 6, można by powiedzieć, że strefy czasowe są określeniami arbitralnymi i zmieniają się w zależności od miejsca i czasu. Te określenia są pożyteczne, ale nie zmieniają leżącej u ich podstaw fizyki: na przykład tego, jak szybko obraca się Ziemia. W Modelu Standardowym są nimi ustawienia „krokomierzy" cząstek, kierunek „wiatrowskazu" ładunku kolorowego oraz „orzeł" i „reszka" ładunku słabego. Siły w Modelu Standardowym działają w celu zachowania symetrii, pozwalając tym arbitralnie określonym wartościom zmieniać się bez zmiany sposobu, w jaki zachowuje się Wszechświat.

Wielki Zderzacz Hadronów (LHC – Large Hadron Collider) – to obecnie największy i najpotężniejszy akcelerator cząstek na świecie. Składa się z położonego w Szwajcarii, tuż koło Genewy, ukrytego w podziemnym tunelu 27-kilometrowego pierścienia. LHC zwykle zderza protony z rekordową energią 13 TeV, a przez pewien okres każdego roku poddaje temu procesowi jądra ołowiu.

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) – słabo oddziałujące masywne cząstki, preferowane obecnie wyjaśnienie ciemnej materii.

zasada nieoznaczoności – wprowadzona po raz pierwszy w 1927 roku przez Wernera Heisenberga jako jedna z konsekwencji mechaniki kwantowej zasada nieoznaczoności ma dwie postacie. Pierwsza mówi, że nie możemy jednocześnie poznać dokładnego położenia i pędu cząstki. W konsekwencji ograniczenie cząstki do mniejszej przestrzeni oznacza, że będzie ona dążyła do zwiększenia swojego pędu i ucieczki. Druga postać mówi, że „cząstki wirtualne" mogą na krótko pożyczyć pewną porcję energii: im więcej zostanie pożyczone, tym szybciej musi zostać zwrócone.

Spis treści

NOTA OD AUTORA I PODZIĘKOWANIA
ROZDZIAŁ 1. FUNDAMENTALNA NATURA RZECZYWISTOŚCI
- Świat atomowy
- Od atomów do cząstek
- Siły natury
- Badanie świata subatomowego
- Poszukiwanie

ROZDZIAŁ 2. WIZYTA W ZOO CZĄSTEK ELEMENTARNYCH
- Fizyka rysunkowa
- Rzucając kostką
- W ten czy inny sposób
- „Powiedziałem mu: »Jesteś szalony«. Ale on szalony nie był”.
- Podróż w czasie i antymateria
- Najbardziej precyzyjna teoria naukowa, jaką kiedykolwiek stworzono

ROZDZIAŁ 3. W GŁĄB MATERII
- Fizyka przed cząstkami
- Tajemnicze promienie
- Chmury w pudełku
- Zobaczyć cząstki
- Promienie z kosmosu
- „Kto to zamawiał?”
- Nauka akceleratorowa
- Ścieżka ośmiokrotna
- Budowanie Modelu Standardowego
- Wielka nauka

ROZDZIAŁ 4. NIEWYKRYWALNY KWARK
- Silne kolory
- Zmienianie kolorów
- Latające kolory
- Ucieczka w dżecie
- Pytanie za milion dolarów

Życie wewnątrz protonu
Ukryta siła
ROZDZIAŁ 5. SŁABA JEST SIŁA
Demaskatorskie promieniowanie
Dlaczego oddziaływanie słabe jest słabe
Naginanie praw fizyki
Pary cząstek
Pomieszane kwarki
Anatomia stworzenia
Ukryte oddziaływania
ROZDZIAŁ 6. BOZON HIGGSA
Symetria
O cząstkach i strefach czasowych
Niedoceniana bohaterka fizyki
Nawigacja satelitarna i rzuty monetą
Algebra torów kolejowych
Nadanie problemowi wagi
Przezwojenie elektromagnetyzmu
Ostatnie prace nad Modelem Standardowym
Polowanie na Higgsa
...I odpręż się
ROZDZIAŁ 7. NAJWIĘKSZY EKSPERYMENT
Rozbijanie atomów
Chcecie więc odtworzyć warunki panujące we wczesnym Wszechświecie
Surfując przez historię
Precyzyjna maszyneria
Badanie miejsca zderzenia
Nietypowy aparat cyfrowy
Detektory z dodatkowymi korzyściami
Co można robić z najpotężniejszym akceleratorem cząstek na świecie
Polowanie na garb
Statystyka, cholerna statystyka i bozon Higgsa
ROZDZIAŁ 8. KAŻDE NEUTRINO MA SWÓJ DZIEŃ
Neutrina są wszędzie

- Co wiemy o neutrinach
- Znalezienie neutrin
- Problemy z neutrinami
- Oscylujące neutrina
- Anty-antyneutrina
- Cząstki prawoskrętne
- Czas na neutrina
- Inny rodzaj fizyki cząstek

ROZDZIAŁ 9. W CIEMNOŚĆ
- Gdzie jest cała antymateria?
- Model Standardowy: dlaczego?
- Model Standardowy: zaplątani w pętle
- Ciemna materia
- Ciemna energia
- Dlaczego cząstki są tak lekkie albo... dlaczego grawitacja jest tak słaba?
- Czy istnieje teoria wszystkiego?
- Poza Model Standardowy

ROZDZIAŁ 10. TUTAJ ZACZYNA SIĘ REWOLUCJA
- Supersymetria
- Monopole magnetyczne
- Nowe siły, nowe cząstki
- Dodatkowe wymiary
- Teoria strun i fizyka cząstek bez cząstek
- Najlepszy ze wszystkich możliwych światów?
- Proszę obstawiać...

ROZDZIAŁ 11. W POSZUKIWANIU PIĘKNA
- Polowanie na garb 2
- Ukrywanie się na widoku
- Zakazane pingwiny
- Zwiększanie precyzji
- Polowanie na ciemność
- Większa łódka?
- Sens tego wszystkiego

ROZDZIAŁ 12. NOWA FIZYKA

DODATEK 1. WYJAŚNIENIE ZAPISU LICZB

DODATEK 2. SYMETRIE MODELU STANDARDOWEGO
SŁOWNICZEK